LA CARBONATATION DU BÉTON DANS LES BÂTIMENTS CANADIENS

Présenté à : DIVISION DE LA RECHERCHE
SOCIÉTÉ CANADIENNE D'HYPOTHÈQUES ET DE LOGEMENT
700, chemin de Montréal
Ottawa (Ontario)
K1A 0P7

Rédigé par : ROBERT HALSALL AND ASSOCIATES LIMITED
Ingénrieurs-conseils
6e étage
188, avenue Eglinton est
Toronto (Ontario)
M4P 2X7

Date : Le 10 mars 1993

Consultants principaux : Peter Halsall, M.A.Sc., ing.
John Kosednar, B.A.Sc., ing.

Directeur de projet à la SCHL : Alvin J. Houston

NOTE: ISSUED ALSO IN ENGLISH UNDER THE TITLE:

CONCRETE CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS

La Société canadienne d'hypothèques et de logement, l'organisme du logement du gouvernement fédéral, a pour mandat d'appliquer la Loi nationale sur l'habitation.

Cette loi a pour objet d'aider à améliorer les conditions d'habitation et de vie au Canada. C'est pourquoi la Société s'intéresse à tout ce qui concerne l'habitation, l'expansion et le développement urbains.

Aux termes de la partie IX de la Loi, le gouvernement du Canada autorise la SCHL à consacrer des fonds à la recherche sur les aspects socio-économiques et techniques du logement et des domaines connexes, et à en publier et à en diffuser les résultats. La SCHL a donc l'obligation légale de veiller à faire largement connaître tout renseignement de nature à améliorer les conditions d'habitation et de vie.

La présente publication est l'un des nombreux moyens d'information que produit la SCHL grâce au concours financier du gouvernement fédéral. L'analyse, les interprétations et les recommandations qui en découlent sont celles du consultant et ne reflètent pas nécessairement l'opinion de la Société canadienne d'hypothèques et de logement ou des divisions de la Société qui ont contribué à l'étude ou à sa publication.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les firmes suivantes d'avoir participé à l'élaboration du protocole d'essai et d'avoir procédé à la collecte des données sur le terrain puis à leur analyse en laboratoire.

W.S. Langley and Associates Ltd. (Halifax)
HBT AGRA Limited (Calgary/Edmonton)
B.H. Levelton and Associates Ltd. (Vancouver/Victoria)

Nous remercions également le comité consultatif formé des personnes suivantes d'avoir participé à la révision des diverses ébauches des protocoles d'essai et des rapports provisoires.

J.A. Bickley, ing.
R. Halsall, ing.
W.S. Langley, ing.
D.R. Morgan, ing.
P.T. Seabrook, ing.

Nous sommes aussi très reconnaissants envers MM. R.D. Hooton (université de Toronto) et G.G. Litvan (Institut de recherche en construction, CNRC) des précieux avis techniques qu'ils nous ont communiqués.

Enfin, nous remercions A.J. Houston (SCHL) dont l'enthousiasme et les conseils avisés nous ont évité de perdre de vue nos objectifs.

TABLE DES MATIÈRES

		Page
ABRÉGÉ		vii
RÉSUMÉ		viii
1.	INTRODUCTION	1
	1.1 Objectifs	1
	1.2 Consultants	1
	1.3 Contexte	2
2.	PROCESSUS	5
	2.1 Méthode	5
	2.2 Limites	7
3.	RÉSULTATS	8
	3.1 Observations générales	8
	3.2 Commentaire sur les résultats	10
	3.3 Résultats des essais thermogravimétriques	20
	3.4 Sondage au pachomètre et mesure du potentiel des demi-piles	23
	3.5 Période avant corrosion	27
4.	CONCLUSIONS	30
5.	RÉFÉRENCES	33

ANNEXE A - PROTOCOLE D'ESSAI
ANNEXE B - DONNÉES DE CARBONATATION
ANNEXE C - RÉPARTITION DES PROFONDEURS DE CARBONATATION POUR LES SPÉCIMENS HORIZONTAUX ET VERTICAUX
ANNEXE D - PROFONDEUR DE LA CARBONATATION PAR RAPPORT À L'ORIENTATION DE L'EXPOSITION
ANNEXE E - PROFONDEUR DE LA CARBONATATION PAR RAPPORT À LA HAUTEUR
ANNEXE F - PROFONDEUR DE LA CARBONATATION PAR RAPPORT À LA RÉSISTANCE À LA TRACTION PAR FENDAGE
ANNEXE G - PROFONDEUR DE LA CARBONATATION PAR RAPPORT À L'ÂGE
ANNEXE H - RÉSULTATS DES ESSAIS THERMOGRAVIMÉTRIQUES (sous forme tabulaire)
ANNEXE J - RÉSULTATS DES ESSAIS THERMOGRAVIMÉTRIQUES (sous forme graphique)

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
FIGURES		
Figure 1	Répartition des profondeurs de carbonatation	11
Figure 2	Profondeur de la carbonatation par rapport à l'orientation	13
Figure 3	Profondeur de la carbonatation par rapport à la hauteur	15
Figure 4	Profondeur de la carbonatation par rapport à la résistance à la traction par fendage	17
Figure 5	Profondeur de la carbonatation par rapport à l'âge	19
Figure 7	Teneur en chaux par rapport à la résistance à la traction par fendage	22
TABLEAUX		
Tableau 1	Résultats du sondage au pachomètre et au potentiel des des demi-piles	24
Tableau 2	Période prévue avant corrosion	28

ABRÉGÉ

La carbonatation est la réaction entre le dioxyde de carbone présent dans l'air et la pâte de ciment, qui abaisse l'alcalinité naturelle du béton. Si la carbonatation, dans un élément de béton armé, est suffisamment profonde pour atteindre l'acier d'armature, ce dernier peut se corroder.

Les auteurs de ce rapport ont évalué la profondeur de la carbonatation du béton dans des bâtiments canadiens de même que les répercussions que cette carbonatation aura sur le parc de bâtiments du pays. Ce rapport fait suite à une autre étude commandée par la SCHL[1] qui portait sur l'incidence de la carbonatation dans la région de Toronto.

Les auteurs concluent que, pour l'instant, même si la carbonatation du béton est active à certains endroits, elle n'entraîne pas une corrosion généralisée des structures de béton armé au Canada. Avec le temps, il se produira de la corrosion à certains endroits à cause de la carbonatation, et le problème ne pourra qu'aller en s'aggravant. L'épaisseur et la qualité de l'enrobage sont les plus importants facteurs de protection de l'acier d'armature contre la détérioration causée par la carbonatation. Il n'existe pas de méthode simple (fondée p. ex. sur l'âge, la situation géographique, l'aspect visuel) de prévoir la prédisposition d'une structure particulière à la carbonatation.

Les données sur la profondeur de la carbonatation recueillies dans le cadre de cette étude indiquent que le béton protégé des chutes de pluie directes, mais exposé à un taux d'humidité relativement élevé ou à des gaz d'échappement (comme dans le cas de certaines structures de stationnement, de chaufferies et d'installations industrielles), peut être particulièrement sujet à de la corrosion provoquée par la carbonatation.

MOTS CLÉS : Carbonatation, teneur en ciment, enrobage, durabilité du béton, corrosion, essai à la phénolphtaléine, acier d'armature, analyse thermogravimétrique.

RÉSUMÉ

Introduction

La carbonatation du béton se produit lorsque le dioxyde de carbone présent dans l'air réagit avec divers hydrates à l'intérieur de la pâte de ciment pour produire des carbonates de calcium. Ce phénomène a pour effet de réduire l'alcalinité naturelle du béton. Lorsque la carbonatation atteint l'acier d'armature, elle lui fait perdre sa passivité (immunité à la corrosion) et il s'ensuit la corrosion de l'acier et la détérioration du béton.

Le taux de carbonatation est fonction de la qualité de l'enrobage ainsi que d'effets environnementaux comme l'humidité relative et la concentration du dioxyde de carbone.

On a beaucoup parlé, en Europe et en Australie, de la détérioration du béton causée par la carbonatation. Le phénomène n'a toutefois pas été autant étudié au Canada. C'est pourquoi la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) a commandé une étude en trois phases visant à évaluer les risques futurs de détérioration que pose la carbonatation pour les structures de béton armé des tours d'habitation au Canada. Les deux premières phases ont consisté à examiner la documentation existante et à analyser d'autres recherches sur le sujet ainsi qu'à déterminer les répercussions possibles de la carbonatation dans la région de Toronto.

Ce rapport présente les résultats et les conclusions d'une partie de la phase 3 de l'étude portant sur l'incidence et les répercussions de la carbonatation dans cinq villes canadiennes.

Un rapport complémentaire intitulé «Revêtements anti-carbonatation pour les bâtiments canadiens» présente des résultats préliminaires concernant l'évaluation de revêtements anti-carbonatation.

Objectifs

a) Estimer les cas de problèmes de carbonatation dans les tours d'habitation du Canada et déterminer les effets qu'aura la carbonatation sur la durabilité du parc de bâtiments canadien.

b) Entreprendre un programme de mise à l'essai des mesures correctives se limitant à un seul bâtiment situé à Toronto.

Méthode

Les auteurs ont communiqué avec des agences de logement et des propriétaires d'immeubles de Halifax, Calgary, Edmonton, Vancouver et Victoria afin de repérer un certain nombre d'immeubles se prêtant bien à une inspection. Quatre bâtiments ont été retenus dans chaque ville en fonction de leurs éléments structuraux en béton armé découverts.

Au total, 204 carottes ont été prélevées dans 20 bâtiments différents afin de procéder aux essais à la phénolphtaléine. Vingt de ces carottes ont été choisies pour les analyses thermogravimétriques servant à vérifier les résultats des essais à la phénolphtaléine.

Une fois ces données analysées, l'étude a été poursuivie sur 10 bâtiments pour déterminer l'épaisseur de l'enrobage et le niveau d'activité corrosive.

Les mesures correctives ont été évaluées et un bâtiment déjà choisi pour l'étude pilote menée dans la région de Toronto a été traité. Des dispositions ont été prises avec la Société de logement de l'Ontario dans le but de contrôler l'efficacité de ce traitement de surface.

Résultats

1. La carbonatation du béton connaît une progression générale dans les cinq villes ayant fait l'objet de cette étude. Le rythme de la carbonatation est nettement plus lent sur la côte ouest (Vancouver et Victoria) que dans les autres villes observées.

2. La corrosion, par suite de la carbonatation, de l'acier d'armature noyé dans le béton ne pose pas encore de problème sérieux au Canada. Néanmoins, certaines situations isolées à l'intérieur d'un bâtiment peuvent favoriser la corrosion. Ces situations ont principalement trait aux zones où l'épaisseur ou la qualité de l'enrobage ne sont pas conformes à la norme CSA A23.1. On peut aussi observer une accélération de la carbonatation dans certaines régions caractérisées par la présence de fortes concentrations de CO_2 dans l'air.

3. Les résultats de l'étude confirment que l'enrobage, et la qualité du béton qui le compose, sont les facteurs les plus importants pour maîtriser le rythme de la carbonatation. Même si la carbonatation atteint l'acier d'armature, la corrosion ne commence pas nécessairement tout de suite, quoique le risque s'en trouve considérablement accru.

4. L'essai à la phénolphtaléine s'avère une méthode efficiente pour déterminer la présence de béton carbonaté. Cependant, l'analyse thermogravimétrique a permis de constater qu'il peut se trouver du béton partiellement carbonaté de 10 à 20 mm au-dessous du niveau indiqué par cet essai.

5. Au Canada, on ne sait trop pourquoi, le béton ne semble pas avoir le même degré de corrosion par carbonatation qu'en Europe. Bien que la comparaison avec la situation européenne sorte du cadre de la présente étude, on pourrait avancer que les différences résident dans la qualité de la construction, notamment le degré de durcissement du béton, la quantité et la nature des produits cimentaires, ainsi que les différentes conditions climatiques auxquelles les structures extérieures sont exposées.

   Une réduction du rapport eau/ciment réduira la perméabilité de la masse du béton et le rendra moins vulnérable à la carbonatation. Le climat canadien peut aussi s'avérer un élément essentiel dans la prévention de la carbonatation du béton puisqu'il maintient l'humidité relative des pores du béton au-dessus du niveau optimal (soit 70 p. 100) pendant de longues périodes. Aucune donnée comparative n'a été produite dans les limites de cette étude.

Conclusions

Les données de l'étude fournissent à la SCHL et à d'autres propriétaires fonciers comme les membres de l'Institut canadien des compagnies immobilières publiques (ICCIP) les signes avant-coureurs de ce que sera la situation à Toronto et dans cinq autres villes canadiennes. Une approche méthodique pourra être choisie, si les propriétaires fonciers le jugent nécessaire, pour que des recherches plus poussées examinent la carbonatation des matériaux au Canada et le traitement des surfaces.

L'Association canadienne de normalisation (CSA), qui s'affaire actuellement à rédiger des normes, des lignes de conduite et des documents consultatifs sur la restauration du béton, devrait trouver utile les renseignements issus de la présente étude.

1. Au Canada, la carbonatation aura relativement peu d'effet sur la durabilité de l'actuel parc de bâtiments. Certes, des réparations localisées s'avéreront nécessaires, mais la détérioration généralisée causée par une grave carbonatation dans un bâtiment n'est pas à craindre.

2. La profondeur de la carbonatation peut être mesurée de façon précise dans le cadre d'un examen de la détérioration du béton.

3. À l'heure actuelle, les méthodes de construction canadiennes offrent une protection suffisante contre la carbonatation pourvu que les exigences minimales de la norme CSA A23.1-M90, intitulée «Concrete Materials and Methods of Concrete Construction», soient respectées.

4. De nombreuses variables déterminent le rythme (et la profondeur) de la carbonatation au sein d'un bâtiment particulier. Le rythme de la carbonatation du béton dépend généralement de l'épaisseur et de la qualité de l'enrobage. Toutefois, il n'existe pas de règle simple ou universelle pour quantifier, pour une région géographique donnée, la vulnérabilité d'une structure à la carbonatation.

   Les résultats montrent toutefois que le rythme de la carbonatation est tributaire des conditions environnementales locales. L'humidité relative des pores du béton et la perméabilité du béton influent sur le rythme de la carbonatation. Ainsi, on n'observera habituellement pas de problème de carbonatation à la surface supérieure des éléments structuraux horizontaux exposés à la pluie, mais on pourra s'attendre à en découvrir sur les surfaces verticales disposant d'un enrobage de faible épaisseur ou dont le béton est de piètre qualité (p. ex. fissuré ou mal durci). Une concentration élevée de dioxyde de carbone dans l'air peut aussi agir sur le rythme de la carbonatation.

1. INTRODUCTION

1.1 Objectifs

L'étude vise principalement à estimer la fréquence des cas de carbonatation dans les bâtiments à l'échelle du pays et à évaluer les répercussions qu'aura ce phénomène sur la durabilité du parc de bâtiments actuel. Des essais ont été menés sur des bâtiments de Halifax, Calgary, Edmonton, Vancouver et Victoria. Ce rapport fait suite à une étude précédente commandée par la SCHL[1] sur les effets de la carbonatation dans la région de Toronto.

Le chercheurs veulent également évaluer l'importance de la conception du bâtiment et des méthodes de construction sur le rythme de la carbonatation du béton.

1.2 Consultants

L'étude est le fruit d'une collaboration entre divers consultants qui ont mis en commun leurs connaissances des méthodes de construction locales, ce qui a permis de réduire le nombre d'échantillons prélevés sur le terrain ainsi que le coût des essais en laboratoire.

Le consultant principal pour cette étude est Robert Halsall and Associates Ltd. de Toronto. Les collaborateurs sont John A. Bickley Associates Ltd. (Toronto), W.S. Langley and Associates Ltd. (Halifax), HBT Agra Limited (Calgary) et B.H. Levelton and Associates Ltd. (Vancouver).

Dans le cadre d'un programme de recherche parallèle actuellement en cours à Toronto, la firme Robert Halsall and Associates Ltd. étudie les effets à long terme de divers revêtements sur la carbonatation d'ouvrages de béton très perméables.

1.3 Contexte

La carbonatation est un phénomène qui abaisse l'alcalinité naturelle du béton. Elle se produit à la suite d'une réaction entre le béton (plus précisément les hydrates de l'hydroxyde de calcium et du silicate de calcium que contient la pâte de ciment) et le dioxyde de carbone présent dans l'air qui produit des carbonates de calcium. Pour que la réaction survienne, il doit y avoir suffisamment d'eau dans les pores du béton pour que le dioxyde de carbone puisse se dissoudre. C'est la consommation d'ions hydroxyles qui abaisse l'alcalinité.

Bien que diverses propriétés du béton et conditions environnementales puissent favoriser la carbonatation, le mécanisme qui entraîne la détérioration du béton armé demeure constant. L'acier noyé dans un électrolyte aéré à pH élevé comme le béton est d'abord passif. En effet, la présence d'oxygène et le pH élevé produisent une couche d'oxyde gamma ferrique (Fe_2O_3) à la surface de l'acier qui sert de protection anticorrosion[17]. La carbonatation abaisse l'alcalinité du béton et, de ce fait, la couche passive sur l'acier d'armature perd progressivement sa stabilité. À un pH inférieur à 11, la passivité est généralement détruite et l'acier d'armature devient alors vulnérable à la corrosion[17]. La section des barres d'acier est réduite par la corrosion, ce qui entraîne une diminution de la capacité de cet élément d'armature. De plus, le produit de corrosion qui en résulte occupe beaucoup plus de volume que l'acier intact, un phénomène qui crée des contraintes à l'intérieur du béton. Ces contraintes se traduisent par l'effritement du béton. Comme le béton se sépare de l'acier d'armature, l'effet de synergie de l'assemblage composite s'en trouve annulé, ce qui diminue la capacité de l'élément structural.

Le rythme de la carbonatation dépend en partie de la teneur en humidité des pores de la matrice de la pâte de ciment. Les pores doivent contenir assez d'humidité pour dissoudre le dioxyde de carbone présent dans l'air, mais une saturation totale des pores atténue la carbonatation en ralentissant la diffusion du dioxyde de carbone de la surface exposée à la zone de carbonatation. Le rythme de la carbonatation est maximal quand l'humidité relative des pores est de l'ordre de 50 à 70 p. 100[2,3,4]. Étant donné que la carbonatation est déterminée par la diffusion du dioxyde de carbone, on s'entend généralement pour dire que le rythme de la carbonatation est inversement proportionnel à la racine carrée du temps (selon la loi de Fick).

Le rythme de la diffusion (donc de la carbonatation) dépend également de la concentration du dioxyde de carbone dans l'air local et de la perméabilité du béton. Le béton peut être exposé à des concentrations élevées de dioxyde de carbone lorsqu'il se trouve à proximité des procédés de combustion d'hydrocarbures qui le produisent.

La perméabilité du béton est fonction de la teneur totale en ciment, du rapport eau/ciment, des techniques de mise en place (vibration appropriée, degré de ségrégation des agrégats, etc.) et de la cure ainsi que d'autres variables, quoique dans une moindre mesure. De nombreux modèles mathématiques de carbonatation tentent d'utiliser la résistance à la compression en tant que variable unique servant à représenter l'effet intégral de toutes ces propriétés différentes sur le rythme de la carbonatation. [5]

Bon nombre d'études ont été menées en vue de déterminer l'effet des différents adjuvants de béton ou additifs cimentaires sur le rythme de la carbonatation. Mais les faits se contredisent sur cette question[5]. En effet, certaines études arrivent à la conclusion que l'ajout, au mélange, d'un laitier granuleux de haut fourneau ou de cendres volantes rend le béton plus vulnérable à la carbonatation[6,7,8,9,18], tandis que d'autres laissent croire que ces adjuvants ont très peu d'effet sur le rythme de la carbonatation[10,11,12].

D'autres rapports sont plus précis. Ils concluent que les additifs cimentaires ont un effet négatif sur la résistance à la carbonatation lorsqu'ils sont utilisés pour remplacer le ciment Portland, mais qu'ils sont avantageux lorsqu'ils servent à remplacer le sable dans le mélange de béton[13,14,15]. De nos jours, les mélanges de béton sont généralement plus légers (moins de ciment Portland pour une résistance donnée) et présentent donc des rapports eau/ciment plus élevés (en l'absence de réducteurs d'eau). Ces facteurs accroissent la perméabilité du béton et, du même coup, sa vulnérabilité à la carbonatation[16].

Certains chercheurs croient que la carbonatation est un phénomène autolimitatif[5]. Le volume du sous-produit que constitue le carbonate de calcium est plus grand que les hydrates de l'hydroxyde de calcium et du silicate de calcium que ce qui se trouvait au départ dans le béton non carbonaté. Il s'ensuit une réduction de la perméabilité de la masse du béton[5,6,16]. Cependant, il peut en être autrement pour les bétons qui contiennent un laitier granuleux de haut fourneau[6,23].

Une telle réduction de la perméabilité a tendance à ralentir la diffusion du dioxyde de carbone de la surface exposée à la zone de carbonatation. On a signalé[5] que la carbonatation peut avoir les avantages suivants :

i) augmentation de la résistance à la compression;
ii) augmentation du module d'élasticité;
iii) augmentation de la dureté superficielle;
iv) augmentation de la résistance au gel, au sulphate et à la pénétration des chlorures.

Cependant, ces avantages sont annulés pour ce qui est de la durabilité des structures de béton armé si la carbonatation atteint l'acier d'armature puisque celui-ci devient alors vulnérable à la corrosion.

2. PROCESSUS

2.1 Méthode

Cette étude porte sur des bâtiments situés dans cinq villes canadiennes, soit Halifax, Calgary, Edmonton, Vancouver et Victoria. Pour être sélectionnés, les bâtiments devaient posséder des éléments structuraux en béton armé découverts.

Les résultats obtenus sont censés représenter les conditions qu'on trouve dans les tours d'habitation de toutes les villes à l'étude, à l'exception de Victoria, où tous les bâtiments étudiés sont à vocation «institutionnelle». On croit généralement que les structures de béton de ces bâtiments sont de meilleure qualité que les immeubles résidentiels. Les chercheurs ont dû inclure des bâtiments institutionnels dans l'étude de Victoria en raison de l'absence de tours d'habitation présentant des éléments structuraux en béton armé découverts.

Le nombre de carottes obtenues dans chaque ville varie de 36 à 48 selon le protocole d'essai (Annexe A). Certains facteurs locaux pouvant modifier le rythme (donc la profondeur) de la carbonatation ont été observés durant l'étude sur le terrain (âge de la structure, éléments structuraux, exposition aux intempéries, hauteur, orientation). La résistance à la traction par fendage a été mesurée pour chacune des carottes de 50 mm analysées pour faire en sorte qu'elles correspondent aux résultats d'une étude antérieure[1].

Une solution de phénolphtaléine (indicateur de pH) a été appliquée sur une section fraîchement exposée de chaque carotte. La surface du béton devient généralement rouge lorsque le pH est supérieur à 9 tandis que les surfaces dont le pH est inférieur à 9 demeurent incolores. Bien que cette méthode ne permette pas de déterminer la profondeur exacte de la carbonatation (c.-à-d. la distance entre la surface du béton et la ligne séparant le béton intact du béton partiellement carbonaté), elle fournit tout de même une indication du progrès de la carbonatation. On a établi que la profondeur réelle de la carbonatation peut être jusqu'à 10 mm plus profonde que ce qu'indique l'essai à la phénolphtaléine[5]. Malgré tout, le faible coût et la simplicité de cet essai en font un outil utile pour recueillir des données comparatives à partir d'un grand nombre d'échantillons.

Quatre carottes provenant de chacune des villes ont fait l'objet d'une analyse plus poussée au moyen de la méthode thermogravimétrique. Cet essai mené en laboratoire mesure la teneur en $Ca(OH)_2$ (chaux) et en $CaCO_3$ (carbonate) du béton afin d'obtenir une mesure directe du degré de carbonatation à différentes profondeurs. Ces résultats sont comparés aux résultats de l'essai à la phénolphtaléine afin de confirmer la validité de ces derniers.

Après analyse des données relatives à la profondeur de la carbonatation, deux bâtiments de chaque ville ont été choisis pour procéder à de plus amples analyses relatives à la corrosion. L'acier d'armature à proximité des carottes a été repéré et l'épaisseur de l'enrobage mesuré. Le potentiel des demi-piles (par rapport à une électrode de référence en $Cu/CuSO_4$) a été enregistré tout au long de l'acier d'armature afin d'évaluer la probabilité d'une activité corrosive.

2.2 Limites

Le protocole d'essai (Annexe A) explique les critères qui ont mené au choix des bâtiments et des zones d'échantillonnage devant faire partie de l'étude. Vu que les équipes de chercheurs n'ont pas eu accès aux registres de mise en place du béton, les données relatives à la profondeur de la carbonatation ne peuvent faire l'objet d'une corrélation avec les variations selon le type de mélange du béton (teneur en ciment, rapport eau/ciment, adjuvants), les méthodes de mise en place, de cure, etc. Chacun de ces facteurs peut influer sur le rythme de la carbonatation de l'enrobage, mais ne sont habituellement pas accessibles aux inspecteurs lorsque ceux-ci évaluent des bâtiments existants.

Les mesures de la teneur locale en dioxyde de carbone et de l'humidité relative n'ont pas été incluses dans l'étude, du moins partiellement puisqu'il n'existe pas de mesure standard dans le temps.
La résistance à la traction par fendage de chaque carotte de 50 mm de diamètre a été enregistrée en même temps que l'essai à la phénolphtaléine. (On a employé des carottes de 50 mm de diamètre afin de déranger le moins possible les propriétaires d'immeuble qui ont accepté de participer à l'étude.) La valeur absolue de la résistance à la traction par fendage n'est pas fiable en raison de l'effet disproportionné qu'ont les granulats de forte granulométrie dans les spécimens de 50 mm.

3. RÉSULTATS

3.1 Observations générales

Tous les résultats des essais concernant la profondeur de la carbonatation sont présentés à l'Annexe B.

On trouvera ci-dessous des observations générales sur la profondeur de la carbonatation (déterminée par l'essai à la phénolphtaléine) observée dans chacune des villes. On a établi que 15 mm constituait une profondeur raisonnable au-delà de laquelle il pourrait se trouver de l'acier et on s'en est servi pour illustrer les différences entre les villes.

a) Halifax :
- 4 des 16 échantillons révèlent une profondeur de carbonatation (p_c) supérieure à 15 mm
- ces quatre échantillons ont été obtenus de surfaces de béton verticales
- 3 des 4 bâtiments présentent au moins un échantillon dont la p_c est supérieure à 15 mm

b) Calgary :
- 7 des 16 échantillons révèlent une p_c supérieure à 15 mm
- ces sept échantillons ont été obtenus de surfaces de béton verticales
- 3 des 4 bâtiments présentent au moins un échantillon dont la p_c est supérieure à 15 mm

c) Edmonton :
- 5 des 12 échantillons révèlent une p_c supérieure à 15 mm
- ces cinq échantillons ont été obtenus de surfaces de béton verticales
- 3 des 4 bâtiments présentent au moins un échantillon dont la p_c est supérieure à 15 mm

d) Vancouver :

- 1 des 12 échantillons obtenus de 4 bâtiments différents révèle une p_c supérieure à 15 mm
- cet échantillon a été obtenu d'une surface de béton verticale

e) Victoria

- 2 des 12 échantillons révèlent une p_c supérieure à 15 mm
- ces deux échantillons ont été obtenus d'une surface de béton verticale
- les deux échantillons ont été obtenus de bâtiments différents

Cette analyse macroscopique des données laisse supposer que la carbonatation se produit dans toutes les villes étudiées, mais qu'elle est plus fréquente à Halifax, Calgary et Edmonton qu'à Vancouver et Victoria. En comparaison, une étude précédente de la SCHL[1] avait montré que 38 échantillons sur 116 obtenus de bâtiments de Toronto présentaient une p_c supérieure à 15 mm.

Un échantillon est composé de trois carottes; la troisième n'était analysée qu'en cas de non concordance entre les résultats obtenus pour les deux premières. Il n'a fallu analyser les trois carottes que pour 8 des 68 échantillons de l'étude. Les résultats des essais à la phénolphtaléine pour les différentes carottes d'un même échantillon sont assez uniformes.

On a remarqué un large écart dans la profondeur de carbonatation des différents échantillons (différents éléments) de chacun des bâtiments (Annexe B). Cette variabilité est examinée avec plus de détail dans les sections qui suivent.

En général, les résultats obtenus par analyse thermogravimétrique confirment les résultats des essais à la phénolphtaléine.

De nombreux bâtiments à l'étude ont été conçus et construits avant 1970. Les codes du bâtiment en vigueur à l'époque[22] exigeaient généralement que l'enrobage des éléments structuraux exposés aux intempéries respecte les dimensions minimales suivantes :

i) 2 pouces (50 mm) pour les barres de plus de 15 m (n° 6 et plus);
ii) 1½ pouce (38 mm) pour les barres de 15 m et moins (n° 5 et moins);

Un sondage au pachomètre de huit des seize bâtiments à l'étude a révélé que l'épaisseur de l'enrobage est généralement conforme et même supérieure aux exigences du Code concernant les éléments de béton armé. Consulter la section 3.4 pour obtenir les résultats de ce sondage au pachomètre.

Aucun des bâtiments à l'étude ne présentait de dommages causés par la carbonatation.

3.2 Commentaires sur les résultats

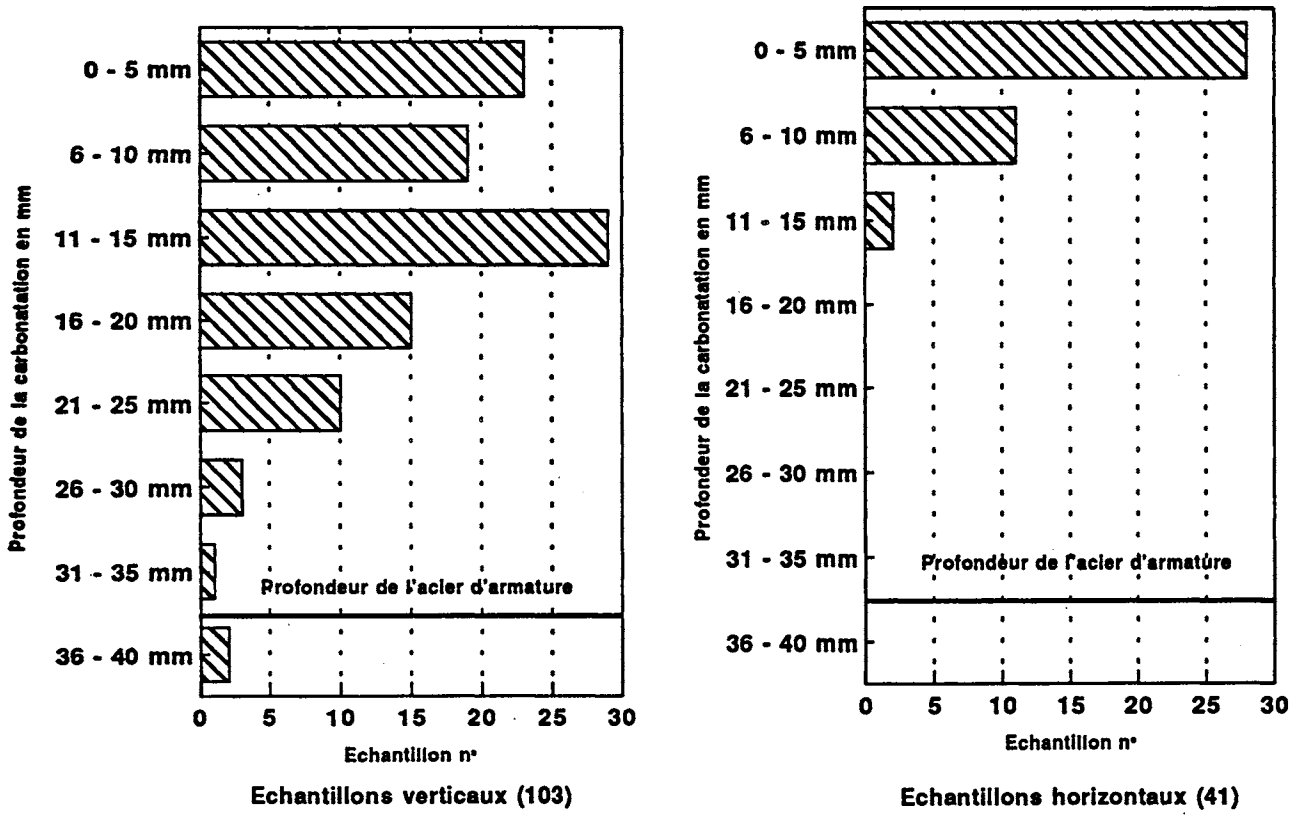
Les données sur la carbonatation obtenues à partir des essais à la phénolphtaléine ont été réorganisées afin d'examiner l'effet de divers facteurs sur la profondeur de la carbonatation.

3.2.1 Types d'élément structural

Les éléments pouvant faire l'objet d'un échantillonnage étaient verticaux (colonnes, murs de contreventement, murs de fondation exposés) ou horizontaux (dessus de la surface des dalles ou des auvents de balcon).

Les données de carbonatation ont été inscrites dans ces deux catégories et paraissent à la Figure 1.

Figure 1
Repartitions des profondeurs de carbonatation - resume



Les résultats relatifs à la profondeur de la carbonatation pour chacune des villes sont présentés aux figures 1A à 1E de l'Annexe C.

En général, la Figure 1 montre que la carbonatation est plus profonde, en moyenne, à l'intérieur des éléments verticaux qu'à l'intérieur des éléments horizontaux. Comme cette variabilité avait été prévue, beaucoup moins de carottes ont été prélevées sur des éléments horizontaux.

i) En ce qui concerne les éléments horizontaux, la profondeur de carbonatation moyenne excède 10 mm pour 2 carottes seulement sur 41. L'une des deux zones de prélèvement (11 mm; HT2, de Vancouver) était partiellement à l'abri des chutes de pluie directes; l'autre (11,52 mm; E/SP/S-1, d'Edmonton) était exposée aux précipitations.

ii) Pour ce qui est des éléments verticaux, la profondeur de la carbonatation excédant 15 mm, en pourcentage, varie de 37 p. 100, pour Halifax, à 20 p. 100, pour Victoria. Aucune corrélation avec l'exposition aux chutes de pluie n'a été notée pour les éléments verticaux.

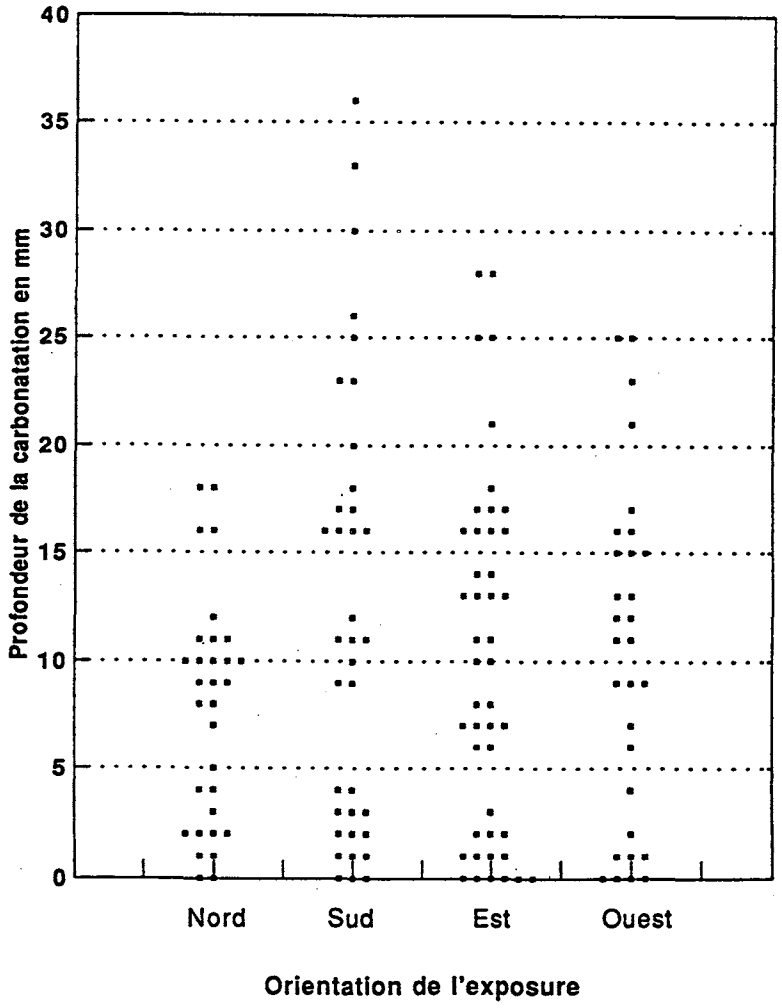
Le rythme de la carbonatation est maximisé à une humidité relative se situant entre 50 p. 100 et 70 p. 100[2,3,4]. Des études antérieures[5,19,20] ont permis de découvrir que le rythme de la carbonatation est généralement plus élevé dans des conditions plus sèches (p. ex. béton intérieur ou éléments à l'abri des chutes de pluie directes). Les pores des éléments de béton horizontaux qui sont exposés à la pluie demeurent saturés beaucoup plus longtemps que les éléments verticaux dont l'exposition à la pluie est similaire. En effet, la diffusion du dioxyde de carbone vers le front de carbonatation est amoindrie par le taux de saturation excessif. Le rythme de la carbonatation s'en trouve d'autant réduit, ce qui explique les résultats donnés au point i) ci-dessus. La profondeur de la carbonatation en sous-face des dalles horizontales n'a pas fait partie de cette étude; le rythme de la carbonatation devrait y être plus élevé puisque cette surface est protégée des chutes de pluie directes.

Les tendances observées dans cette étude confirment que la carbonatation progresse plus lentement à la surface des éléments horizontaux. Et ces résultats concordent avec des études antérieures.

3.2.2 Orientation

La répartition des données relatives à la profondeur de la carbonatation a été organisée selon l'orientation (direction de l'exposition) de chacun des échantillons prélevés. Les données qui en résultent pour chaque ville sont présentées aux figures 2A à 2E de l'Annexe D. Le résumé de l'ensemble des données paraît à la Figure 2 ci-dessous. Aucune tendance marquée, relativement à la profondeur de la carbonatation, n'a été notée dans l'une ou l'autre des villes en ce qui a trait à l'orientation des éléments exposés.

Figure 2
Profondeur de la carbonatation par rapport a l'orientation de l'exposition - resume

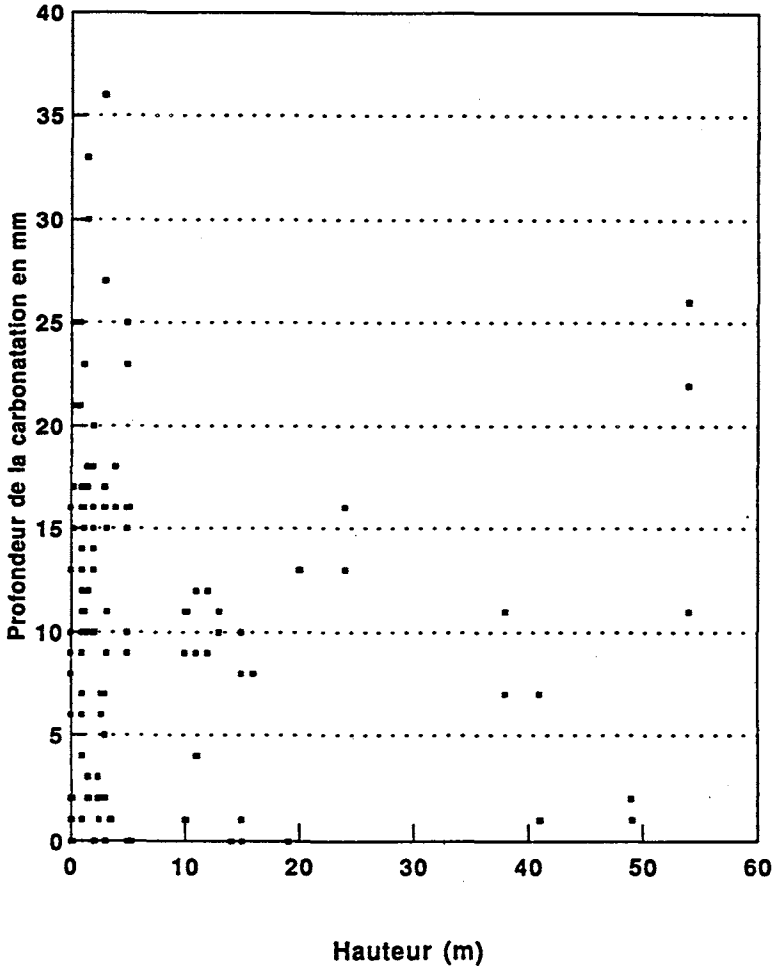


En général, il semble que le rythme de la carbonatation a été le plus élevé du côté sud et le moins élevé du côté nord. On a établi que les différences d'humidité relative à l'intérieur des pores pouvaient en être la cause (les pores sont probablement plus secs du côté sud). Le rythme de la carbonatation est tributaire du microclimat qui caractérise les pores, un facteur qui peut varier considérablement pour différents éléments du bâtiment. Ainsi, pour une teneur en humidité donnée des pores du béton, si la température s'élève (à la suite de gains solaires réalisés du côté sud par exemple), l'humidité relative baissera. Par conséquent, l'orientation ne peut seule être utilisée comme indicateur prévisionnel du rythme de la carbonatation.

3.2.3 Hauteur

Le rythme de la carbonatation peut être augmenté par un accroissement de l'exposition au dioxyde de carbone occasionné par les gaz d'échappement des automobiles. La concentration des gaz d'échappement dans l'air est habituellement plus élevée près de la base d'un bâtiment, particulièrement dans le cas des bâtiments situés près d'une rue à grande circulation ou d'autres sources de sous-produits de la combustion. Aucun bâtiment industriel n'a fait partie de la présente étude; les concentrations élevées de CO_2 proviennent donc principalement des gaz d'échappement des automobiles. Les résultats obtenus pour chaque ville sont présentés aux figures 3A à 3E de l'Annexe E et les données recueillies sont résumées à la Figure 3 ci-dessous.

Figure 3
Profondeur de la carbonatation par rapport a la hauteur - Resume



Les données appuient l'hypothèse selon laquelle le rythme de carbonatation du béton est généralement inversement proportionnel à la hauteur de l'échantillon par rapport au sol. Si l'on élimine des résultats des essais les anomalies obtenues pour deux des bâtiments à l'étude, on peut établir un lien manifeste. Les anomalies en question ont touché les sites N et S de Vancouver; la carbonatation la plus profonde a été observée dans deux échantillons prélevés du toit. Dans l'un de ces cas, un échantillon provenant d'une surface verticale (échantillon N1) se trouvait près d'un conduit de ventilation d'extraction du toit, un endroit susceptible de présenter des concentrations élevées en CO_2 dans l'air immédiat.

Pour certains bâtiments, on a noté une relation manifeste entre la profondeur de la carbonatation et la proximité d'un fort volume de circulation automobile (élévation de la concentration de CO_2).

Au site n° 6653-B (Halifax), le côté ouest du bâtiment est exposé à la circulation automobile et le côté est fait face au port. Le côté ouest (exposé aux gaz d'échappement) présente une plus grande carbonatation (se référer à l'Annexe B).

Au site n° 6653-C (Halifax), les colonnes de béton d'un garage ouvert, au niveau du sol et au-dessous du bâtiment, sont beaucoup plus carbonatées qu'ailleurs dans ce bâtiment.

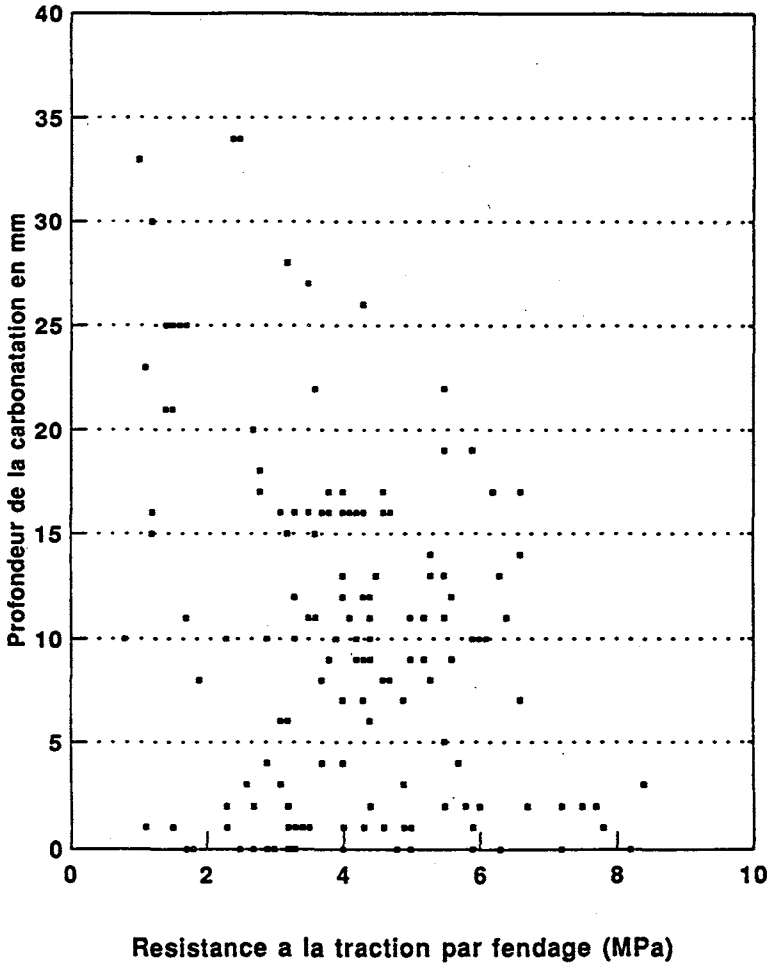
Un comportement similaire a été observé au site n° C/E de Calgary (Annexe B). Une colonne située au niveau du sol était plus profondément carbonatée que les échantillons prélevés sur des surfaces verticales plus élevées. (La variation de la résistance à la traction par fendage pourrait être un facteur à considérer; consulter la section 3.2.4.)

3.2.4 Propriétés du béton

Les caractéristiques de résistance du béton offrent une indication générale sur une série de facteurs comme la teneur en ciment, le rapport eau/ciment, la porosité, les méthodes de mise en place et de cure, etc. La perméabilité du béton dépend de chacun de ces facteurs qui peuvent effectivement faire varier le rythme de la carbonatation.

Dans la Figure 4 ci-dessous, la profondeur de la carbonatation est tracée en fonction de la résistance à la traction par fendage. (Les résultats pour chacune des villes sont donnés aux figures 4A à 4E, Annexe F.)

Figure 4
Profondeur de la carbonatation par rapport a la resistance a la traction par fendage - Resume



Les données recueillies à Halifax, Calgary et Edmonton semblent indiquer une corrélation entre la profondeur de la carbonatation et la résistance du béton. Aucune corrélation de la sorte n'a toutefois pu être établie à Vancouver ou à Victoria.

La profondeur de la carbonatation varie largement à toutes les valeurs de la résistance à la traction par fendage. Des carottes très peu carbonatées ont été observées à toutes les valeurs de la résistance à la traction par fendage, ce qui indique que les conditions prédisposant à la carbonatation n'étaient pas toutes présentes.

La profondeur de carbonatation maximale décroît généralement à mesure qu'augmente la résistance à la traction par fendage. Cette tendance est le plus marquée pour les données recueillies à Edmonton.

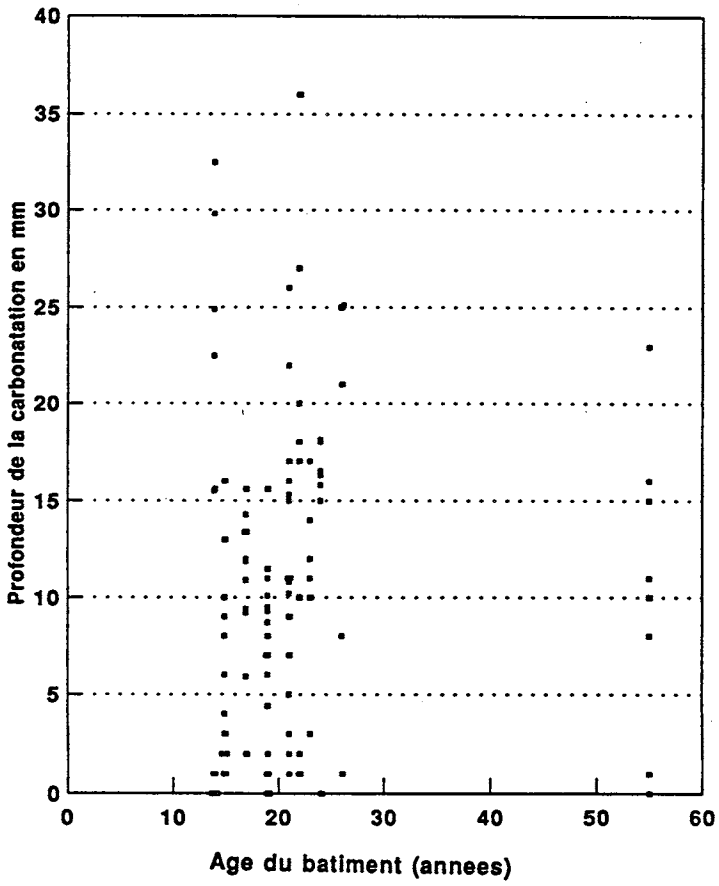
Les valeurs de la résistance à la traction par fendage sont légèrement plus élevées à Vancouver et à Victoria comparativement aux autres villes. Bien que la précision absolue de chacune des mesures soit discutable, l'échantillon n'en indique pas moins une tendance. Les quatre bâtiments de Victoria sélectionnés pour cette étude peuvent être considérés comme des bâtiments «institutionnels» dont la qualité de construction correspond au moins à la moyenne comme le définit le protocole d'essai (Annexe A). Par ailleurs, les quatre bâtiments de Vancouver retenus en vue de l'étude sont des tours d'habitation. En dépit des différences dans le type de bâtiment choisi, les deux séries de données sur la résistance à la traction par fendage sont révélatrices de la qualité supérieure du béton à Vancouver et à Victoria.

Les carottes prélevées à Vancouver et à Victoria présentent moins de carbonatation que celles qui ont été prélevées dans les trois autres villes participantes. Seules deux carottes provenant de Vancouver (et aucune de Victoria) présentaient une profondeur de carbonatation supérieure à 20 mm (à la hauteur de la construction hors toit de l'ascenseur; consulter la section 3.2.3).

3.2.5 Âge

À la Figure 5, la profondeur de la carbonatation est tracée en fonction de l'âge des bâtiments. Les résultats obtenus pour les différentes villes sont donnés aux figures 5A à 5E de l'Annexe G.

Figure 5
Profondeur de la carbonatation par rapport a l'age du batiment - Resume



Ces chiffres montrent que le temps seul ne peut servir à prévoir la carbonatation. Une structure ne peut être catégorisée comme «sujette aux dommages causés par la carbonatation» du seul fait de son âge. Néanmoins, il est bien établi que la profondeur de la carbonatation est fonction du temps. Malheureusement, la taille et la répartition de notre échantillon ne peuvent pas être utilisées pour confirmer cette hypothèse.

3.3 Résultats des essais thermogravimétriques

Les essais thermogravimétriques donnent une indication précise de la progression de la carbonatation dans une section de béton puisqu'ils mesurent les variations de la teneur en chaux ($Ca(OH)_2$) et en carbonate ($CaCO_3$). C'est que le procédé de carbonatation entraîne la consommation de chaux et la production de carbonates. Les données tabulaires issues des essais thermogravimétriques visant à déterminer la profondeur de la carbonatation sont présentées à l'Annexe H et illustrées sous forme graphique à l'Annexe J. Les lignes pleines des figures de l'Annexe J représentent l'écart entre les teneurs en chaux et en carbonate par rapport à la profondeur de la carbonatation. Les résultats des essais à la phénolphtaléine sont indiqués par les lignes pointillées; elles représentent le béton complètement carbonaté. Pour les besoins de cette étude, on a supposé que les résultats des essais à l'horizon de 65 à 60 mm représentait la teneur initiale en chaux du béton hydraté (teneur maximale en chaux du béton non carbonaté).

Des observations générales suivent :

i) La profondeur de la carbonatation mesurée par l'essai à la phénolphtaléine correspond à une teneur en chaux ($Ca(OH)_2$) de moins de 1 p. 100 (par rapport au poids du béton). Les exceptions sont illustrées aux figures 6C, 6K et 6U.

ii) La plupart des essais thermogravimétriques confirment que les résultats des essais à la phénolphtaléine indiquent la profondeur de la carbonatation totale. Les exceptions notables sont illustrées par les figures 6C (les essais à la phénolphtaléine indiquent une profondeur de carbonatation de 20 mm tandis que la méthode thermogravimétrique indique une profondeur de moins de 15 mm) et 6H (les essais à la phénolphtaléine n'indiquent aucune carbonatation mesurable, alors que les résultats des essais thermogravimétriques indiquent qu'au moins 10 mm de la carotte analysée est carbonatée à 100 p. 100).

iii) Dans certains cas, la carbonatation partielle s'étend de 10 à 20 mm plus profond que ce qu'indique l'essai à la phénolphtaléine. Ce phénomène est particulièrement visible dans les figures 6A, 6E, 6F, 6G, 6H (voir le point ii ci-dessus), 6J et 6R.

iv) La profondeur de la carbonatation partielle correspond généralement à la zone où la teneur en carbonate augmente. Et c'est dans cette même zone que l'on constate une diminution de la teneur en chaux.

v) Les teneurs en carbonate dans les zones «non carbonatées» des carottes sont relativement uniformes d'une ville à l'autre. Les données de Calgary font toutefois exception. La teneur en carbonate des échantillons de béton provenant de cette ville est beaucoup plus élevée que chez les autres spécimens recueillis à l'occasion de cette étude.

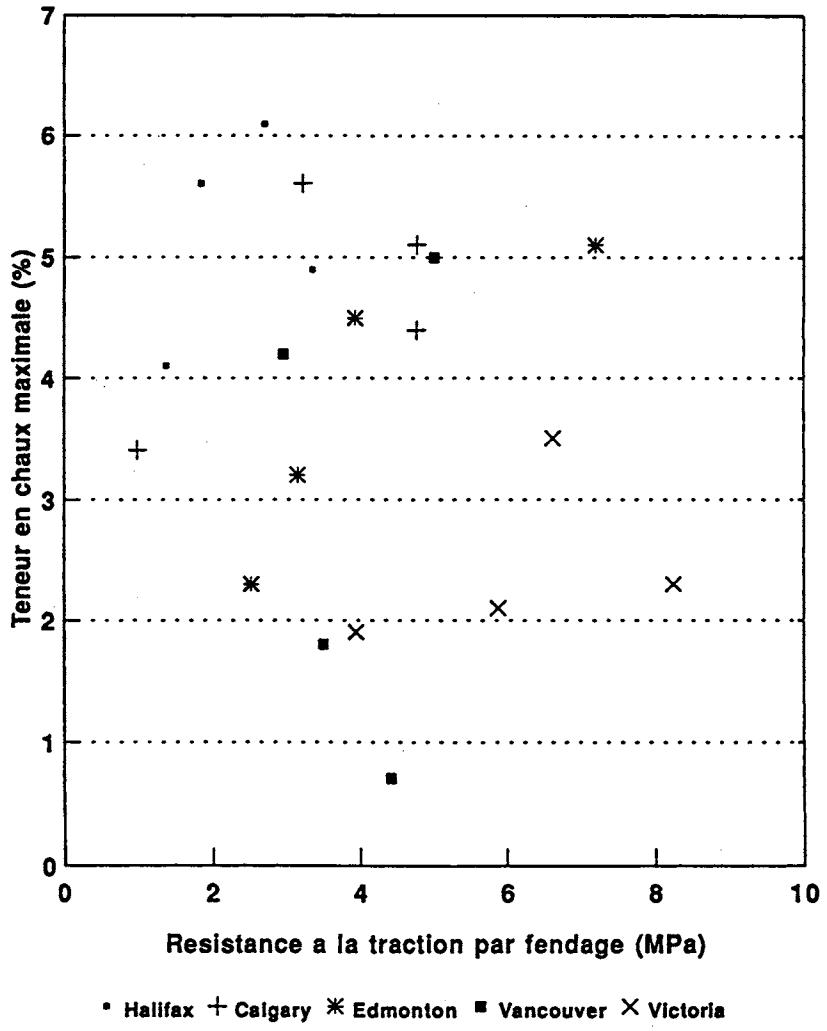
vi) La teneur maximale en chaux des carottes varie considérablement d'un bâtiment à l'autre parmi les villes participantes. La teneur maximale en chaux peut être reliée à la teneur en ciment totale du mélange initial, au degré d'hydratation du ciment ou au type de granulat utilisé. Chacun de ces facteurs peut influer sur le rythme de la carbonatation.

vii) Si la teneur maximale en chaux est liée à la teneur totale en ciment hydraté, alors cette teneur maximale en chaux (béton non carbonaté) devrait également être directement liée à la résistance du béton. La seule exception à cette règle pourrait être l'ajout, au mélange, d'adjuvants du ciment (comme la pouzzolane, le laitier granuleux de haut fourneau, la fumée de silice). Cependant, l'utilisation de ces matières n'était pas généralisée au Canada lorsque la plupart de ces bâtiments ont été construits.

viii) La profondeur de la carbonatation n'est pas fonction de la valeur absolue de la teneur maximale en chaux. Cependant, la valeur absolue de la teneur en chaux près de la surface du béton est importante parce qu'elle indique la capacité de réserve de la chaux.

Étant donné que la résistance à la compression et le mélange initial ne sont connus pour aucun des échantillons de béton, la teneur maximale en chaux a été tracée, sur la Figure 7 qui suit, à partir de la résistance à la traction par fendage de quatre carottes provenant de chaque ville.

Figure 7
Teneur en chaux maximale par rapport a la resistance a la traction par fendage du beton - Resume



Il est difficile d'interpréter les données de la Figure 7 avec certitude puisque les résultats individuels de résistance à la traction par fendage ne sont pas fiables et parce qu'on ne peut déterminer la teneur maximale en chaux du béton non carbonaté. Néanmoins, on a pu faire les observations suivantes :

a) la résistance à la traction par fendage des carottes d'Edmonton augmente proportionnellement avec la teneur en chaux; ce résultat est prévisible puisque la teneur en chaux est révélatrice de la teneur en ciment hydraté;

b) à Vancouver, la résistance à la traction par fendage des carottes ne semble pas être liée à la teneur en chaux; ainsi, deux des spécimens avaient les teneurs en chaux les plus faibles parmi les échantillons de l'étude;

c) en général, les carottes de Victoria présentent une teneur en chaux moins élevée que les autres villes, malgré le fait que la résistance à la traction par fendage y est généralement supérieure;

d) les résultats obtenus à Halifax sont à l'opposé de ceux obtenus à Victoria; la teneur en chaux y est généralement plus élevée que dans les autres villes, mais les carottes sont habituellement moins résistantes à la traction par fendage;

Les carottes d'Halifax se sont avérées davantage carbonatées (dans l'ensemble) que celles de Victoria, ce qui semble indiquer que la résistance du béton (en termes de perméabilité) est un facteur plus significatif que la teneur en chaux libre (du ciment) pour déterminer le rythme de la carbonatation.

3.4 Sondage au pachomètre et mesure du potentiel des demi-piles

Aucun des éléments de béton armé exposés à l'occasion de cette étude ne présentait de signes visibles de détérioration.

Les résultats des essais à la phénolphtaléine, de même que les résultats du sondage au pachomètre et de la mesure du potentiel des demi-piles (visant à déterminer la profondeur de l'acier d'armature et le niveau de corrosion), figurent au Tableau 1 qui suit.

Tableau 1

Résultats du sondage au pachomètre et de la mesure du potentiel des demi-piles

Ville/ échantillon n°	Profondeur de la carbonatation (mm)[1]	Variation de l'épaisseur de l'enrobage de béton (mm)	Variation du potentiel des demi-piles (mV)[2]
Halifax			
A1	de 21 à 25	de 105 à 120	de -98 à -154
A2	aucun	de 76 à 120	de -122 à -242
A3	de 21 à 25	de 90 à 105	de -21 à -152
B1	aucun	de 60 à 70	de -37 à -296
B2	de 8 à 10	de 60 à 70	de -168 à -278
B3	de 15 à 23	de 0 à 20	**de -326 à -359**
B4	de 10 à 16	de 6 à 32	**de -295 à -339**
Calgary			
C/E/SW	de 15.3 à 15.6	de 35 à 50	de -115 à -245
C/E/BW	de 22.5 à 24.9	de 30 à 45	de -103 à -222
C/E/C	de 29.8 à 32.5	de 35 à 65	de -159 à -300
C/R/EW	de 13.35 à 14.27	> 90	de -97 à -256
C/R/WW	de 11.92 à 13.16	de 45 à 82	de -6 à -327
C/R/S	de 9.16 à 9.69	de 60 à 75	**de -321 à -486**
Edmonton			
E/V/W-S	de 35.9 à 36.0	de 50 à 61	de -31 à -52
E/V/W-E	de 27.0 à 27.4	de 31 à 46	de -95 à -280
E/V/W-N	de 17.0 à 17.2	de 48 à 61	de -10 à -32
E/VA/C	de 15.60 à 15.64	de 48 à 60	de -20 à -48
E/VA/N	de 8.68 à 10.13	de 32 à 45	de -44 à -84
E/VA/S	aucun	* aucun repéré	s.o.
Vancouver			
N1	de 11 à 26	de 27 à 45	de -65 à -132
N2	de 5 à 7	> 100	de -30 à -150
N3	de 9 à 15	* aucun repéré	s.o.
HT1	de 1 à 2	de 30 à 80	de -125 à -225
HT2	de 7 à 11	de 60 à 67	de -42 à -105
HT3	~8	de 12 à 35	**de -180 à -370**
Victoria			
CO1	~11	de 37 à 90	**de -351 à -487**
CO2	de 1 à 9	de 69 à 90	de -202 à -260
CO3	de 16 à 17	de 66 à 150	de -120 à -176
CS1	de 10 à 11	de 4 à 85	de -123 à -325
CS2	de 3 à 12	de 60 à 91	de -127 à -320
CS3	de 14 à 17	de 75 à 89	de -134 à -186

1. La P_c a été mesurée au moyen de l'essai à la phénolphtaléine.
2. Tous les potentiels des demi-piles ont été mesurés par rapport à une électrode de référence en sulfate de cuivre-cuivre ($Cu/CuSO_4$).

En général, l'absence de détérioration du béton peut être attribuée au fait que la carbonatation (dont la profondeur était indiquée par l'essai à la phénolphtaléine) n'avait pas encore atteint l'acier d'armature. La carbonatation n'avait atteint l'acier que dans les échantillons suivants :

a) Halifax, échantillons B3 et B4;
b) Victoria, échantillon CS1.

Selon la méthode d'essai de l'ASTM[21] sur laquelle repose l'interprétation des résultats des mesures du potentiel des demi-piles de l'acier noyé dans le béton, un potentiel plus négatif que -350 mV (par rapport à une électrode de référence en sulfate de cuivre [ESC]) indique une probabilité de 90 p. 100 que l'acier noyé dans ce secteur soit en corrosion active.*

Les deux échantillons de Halifax susmentionnés possédaient un potentiel plus négatif que -350 mV (ESC), mais aucune détérioration du béton n'a pu être observée. Dans les deux cas, les murs de ce bâtiment construit vers 1930 étaient renforcés au moyen d'un treillis métallique. Le treillis était très près de la surface du béton, mais n'occupait pas un volume suffisant pour former une zone de délaminage.

La demi-pile de l'échantillon de Victoria (CS1) affiche un potentiel variant de -315 à -325 mV (ESC) sur une barre d'armature dont l'enrobage a une épaisseur variant de 31 à 51 mm. Ces potentiels peuvent révéler une corrosion active. La carbonatation n'a pénétré le béton qu'à une profondeur de 10 à 11 mm à cet endroit. On a remarqué qu'un secteur adjacent de la barre d'armature recouvert de seulement 4 mm de béton était toujours passif (c'est-à-dire exempt de corrosion).

* Cette méthode d'essai est présentement révisée par l'ASTM. Les critères empiriques faisant partie de cette méthode sont revus parce qu'il a été démontré qu'ils ne sont pas absolus.

Sur les 29 échantillons restants dont on a mesuré le potentiel des demi-piles, seulement 3 ont affiché un potentiel plus négatif que -350 mV (ESC), à savoir :

a) Échantillon de Calgary n° C/R/S
b) Échantillon de Vancouver n° HT3
c) Échantillon de Victoria n° C01

Dans chaque cas, la carbonatation totale (dont la profondeur avait été déterminée par les essais à la phénolphtaléine) n'a pas atteint l'acier d'armature. L'analyse thermogravimétrique révèle que la zone de carbonatation partielle peut s'étendre jusqu'à 10 à 20 mm plus profond que ce qu'indiquent les essais à la phénolphtaléine (se référer à la section 3.3). Cet argument peut servir à expliquer la corrosion d'un court segment de la barre d'armature de l'échantillon n° HT3 prélevé à Vancouver. La carbonatation atteignait une profondeur d'environ 8 mm. L'enrobage sur ce segment d'acier d'armature avait environ 12 mm et le potentiel de la demi-pile était de -370 mV (ESC) (corrosion active). Cinq cents millimètres plus loin, sur la même barre, l'enrobage avait 30 mm d'épaisseur et le potentiel correspondant de la demi-pile était -180 mV (ESC) (état passif).

L'échantillon n° C/R/S de Calgary a affiché des potentiels de corrosion active. La profondeur de la carbonatation (établie par les essais à la phénolphtaléine) n'était que d'environ 9,5 mm, alors que l'enrobage sur les barres d'armature excédait 60 mm. Dans ce cas, il semble que les potentiels de corrosion agressive soient le résultat de la pénétration d'ions chlorure. Lors des travaux initiaux menés sur le terrain, les chercheurs n'avaient pas remarqué que ce secteur particulier était soumis à l'épandage de sels de déverglaçage durant l'hiver; ils ont toutefois confirmé cet état de fait par la suite.

L'échantillon n° C01 de Victoria a aussi affiché des potentiels de corrosion active. La profondeur de la carbonatation a atteint environ 11 mm tandis que l'enrobage dépassait les 37 mm. Le potentiel démontrant la corrosion la plus active (-487 mV) a été enregistré dans une zone où le béton d'enrobage était fissuré. Cette zone se trouvait à environ 300 mm du lieu de prélèvement des carottes. Il est donc probable

que la carbonatation soit plus profonde à proximité de cette fissure. Un autre segment de barre d'armature dans la zone d'échantillonnage bénéficiait d'un enrobage de 90 mm, mais présentait une corrosion active. Ce mur particulier se trouve à 10 m au-dessus du sol et n'est pas soumis à l'action des sels de déverglaçage. Nous ne pouvons pas expliquer cette activité corrosive sans vérifier la teneur initiale du béton en chlorure (des chlorures auraient en effet pu se trouver dans le mélange de béton au moment de sa mise en place).

L'échantillon n° N1 prélevé sur un mur de la construction hors toit d'un bâtiment de Vancouver a montré un comportement inverse. La carbonatation avait pénétré le béton jusqu'à 1 mm de la profondeur minimale de l'acier d'armature dans cette zone d'échantillonnage; pourtant, le potentiel des demi-piles indiquait que la surface de l'acier demeurait passive (c.-à-d. exempte de corrosion).

3.5 Période avant corrosion

Après avoir établi l'âge du bâtiment, la profondeur actuelle de la carbonatation et la profondeur des barres d'armature, il est possible d'estimer la période qui reste avant que la carbonatation atteigne l'acier au moyen de l'équation suivante :

$$d_c = k\sqrt{t}$$

où t correspond à l'âge en années et k à un facteur [mm(années)$^{-1/2}$] représentant toutes les variables qui modifient le rythme de la carbonatation (se référer à la section 1.3).

Les résultats de ces calculs sont présentés au Tableau 2. La période avant corrosion prévue, t_{corr} (en années), représente le temps (à compter de la date de la construction) que mettra le front de carbonatation, tel qu'établi par les essais à la phénolphtaléine, à atteindre l'acier d'armature le plus près de la surface du béton.

Tableau 2 - Période prévue avant corrosion

Ville échantillon n°	Année de la construction	D_a(max.) en mm	k mm/√t	Enrobage de béton (min.) en mm	t_{corr} en années (estim.)
Halifax					
A1	1964	25	4,81	105	476
A2	1964	0	0	76	∞
A3	1964	25	4,81	90	350
B1	1930	0	0	60	∞
B2	1930	10	1,28	60	2 200
B3	1930	23	2,94	0	0
B4	1930	16	2,05	6	9
Calgary					
C/E/SW	1976	15,6	4,03	35	75
C/E/BW	1976	24,9	6,43	30	22
C/E/C	1976	32,5	8,39	35	17
C/R/EW	1973	14,3	3,36	90	717
C/R/WW	1973	13,2	3,10	45	210
C/R/S	1973	9,7	2,28	60	693
Edmonton					
E/V/W-S	1968	36,0	7,51	50	44
E/V/W-E	1968	27,4	5,71	31	30
E/V/W-N	1968	17,2	3,59	48	178
E/VA/C	1971	15,6	3,50	48	188
E/VA/N	1971	10,1	2,27	32	200
E/VA/S	1971	0	0	s.o.	∞
Vancouver					
N1	1969	26	5,54	27	24
N2	1969	7	1,49	100	4 500
N3	1969	15	3,20	s.o.	∞
HT1	1971	2	0,45	30	4 500
HT2	1971	11	2,46	60	600
HT3	1971	8	1,79	12	45
Victoria					
CO1	1969	11	2,35	37	250
CO2	1969	9	1,92	69	1 290
CO3	1969	17	3,62	66	330
CS1	1967	11	2,35	4	3
CS2	1967	12	2,56	60	550
CS3	1967	17	3,62	75	430

Les données du Tableau 2 montrent que la carbonatation du béton peut contribuer à une corrosion isolée de l'acier d'armature pendant la durée utile des bâtiments de toutes ces villes. Toutefois, la possibilité que naissent des problèmes généralisés n'a été signalée que pour deux bâtiments :

a) Calgary : bâtiment C/E
b) Edmonton : bâtiment E/V/W

La carbonatation rapide dans ces deux bâtiments survient à l'intérieur de murs et de colonnes exposés au sud ou à l'est. Les échantillons prélevés sur les élévations nord des deux bâtiments ont affiché un rythme de carbonatation plus lent (consulter l'Annexe B).

Les données relatives au reste des bâtiments faisant partie de cette étude indiquent que la carbonatation ne constitue un problème que dans les zones isolées où l'enrobage est de toute évidence insuffisant (c'est-à-dire qu'il ne répond pas aux exigences minimales de la norme CSA pour l'enrobage [22]).

Le bâtiment B de Halifax (construit vers 1930), dont deux échantillons ont été prélevés sur un mur de fondation consolidé au moyen d'un treillis, illustre le lien entre l'enrobage et la probabilité de détérioration résultant de la carbonatation. Dans les deux échantillons tirés de ce mur de fondation, le treillis est très près de la surface et la carbonatation atteint une profondeur qui va bien au-delà de ce niveau. Le potentiel des demi-piles indique une corrosion active dans les deux échantillons; cependant, aucune détérioration du béton n'était apparente au moment de l'étude. Deux autres échantillons ont été prélevés sur des surfaces horizontales ailleurs dans le bâtiment et la période prévue avant la corrosion dépasse les 2 200 ans (voir le Tableau 2).

Le bâtiment HT de Vancouver, où tous les échantillons ont été prélevés de dalles de balcons couverts (surfaces horizontales), affiche un état similaire. Dans une zone de prélèvement (HT3), on prévoit que la carbonatation atteindra l'acier d'armature en 45 ans, mais cette différence est attribuable à l'absence d'un enrobage convenable. La carbonatation ne devrait pas occasionner de problème de durabilité au cours de la durée utile de ce bâtiment à ses deux autres zones d'échantillonnage, car l'enrobage y est plus épais (consulter le Tableau 2).

Pour ce qui est des autres bâtiments, on estime que la carbonatation, dans les zones bénéficiant d'un bon enrobage, prendra plus de 200 ans (selon les essais à la phénolphtaléine) pour atteindre l'acier d'armature.

4. CONCLUSIONS

La carbonatation du béton progresse de façon générale dans les cinq villes qui ont fait l'objet de cette étude.

Le rythme mesuré de la carbonatation varie considérablement. Des écarts importants ont été relevés d'une ville à l'autre. À Vancouver et Victoria, la carbonatation a tendance à être plus lente qu'à Halifax, Calgary et Edmonton. Dans une étude précédente[1], on signalait pour la ville de Toronto des rythmes de carbonatation comparables à ceux observés à Halifax, Calgary et Edmonton pour la présente étude. Des éléments structuraux différents d'un bâtiment à un autre présentent aussi des rythmes de carbonatation divergents. On a observé que les éléments de béton dont les pores sont saturés pendant une période suffisamment longue ont tendance à afficher un rythme plus lent de carbonatation. En voici des exemples :

a) la surface d'éléments horizontaux exposés (comme les balcons) subissent une carbonatation moins rapide que les surfaces verticales exposées (comme les colonnes et les murs de contreventement);

b) les éléments exposés à des chutes de pluie directes se carbonatent moins vite que les éléments protégés;

c) les éléments exposés donnant au nord des bâtiments peuvent présenter une carbonatation moins rapide que des éléments similaires situés ailleurs dans le même bâtiment.

Aucun signe visible de détérioration du béton par suite d'une activité corrosive de l'acier d'armature induite par la carbonatation n'a été observée durant cette étude. Les résultats des essais révèlent que la carbonatation n'atteint généralement pas l'acier d'armature. C'est sans doute en partie parce que la position de l'armature répond généralement aux exigences du code, donc que l'acier bénéficie d'un enrobage suffisamment épais, conforme aux spécifications. Le moment où la carbonatation atteint l'acier d'armature est ainsi retardé. D'autres facteurs peuvent favoriser une résistance supérieure du béton à la carbonatation comme le degré de consolidation du béton au moment de sa mise en place, le degré de séchage, etc.

Nous en concluons que les méthodes de construction actuellement employées au Canada procurent une protection appropriée contre la carbonatation lorsque les exigences de la norme CSA A23.1-M90, «Concrete Materials and Methods of Concrete Construction», sont respectées.

Cependant, une corrosion active de l'acier d'armature a été notée dans des zones localisés de quatre villes ayant fait partie de l'étude (Edmonton faisait exception). Dans la plupart de ces zones isolées, la carbonatation avait atteint l'acier d'armature parce qu'une barre particulière, ou un court segment de barre, n'était pas placée correctement (c.-à-d. qu'elle se trouvait trop près de la surface du béton). Durant l'étude, on a déterminé que la corrosion prématurée pouvait aussi être causée par une exposition isolée à des taux élevés de CO_2, généralement occasionnée par tout procédé entraînant la combustion d'hydrocarbures. Une telle exposition peut provoquer une accélération du rythme de la carbonatation.

Lorsque le rythme de la carbonatation est extrapolé au moyen de cette équation très élémentaire,

$$d_c = k\sqrt{t}$$

où : d_c représente la profondeur de la carbonatation au moment présent (t),
t représente l'âge du bâtiment en années et
k représente une constante servant à tenir compte de la nature du béton et des conditions environnementales dans une zone spécifique,

on peut s'attendre à ce que l'acier d'armature se corrode par suite des effets de la carbonatation dans des zones localisées de la plupart des bâtiments du Canada au cours de leur existence. Toutefois, cette corrosion se limitera généralement aux endroits où l'enrobage est moins épais ou de piètre qualité (qu'il soit fissuré ou mal durci) ou alors à des zones localisées exposées à des taux élevés de CO_2.

Compte tenu de cette étude, il semble que la carbonatation aura un effet relativement minime sur la durabilité de l'actuel parc de bâtiments du Canada. Il faudra bien réparer certaines zones de béton isolées qui se seront détériorées par l'action de la carbonatation, mais on ne prévoit pas que des travaux de grande envergure soient nécessaires pour rectifier (ou limiter) un problème de détérioration généralisé au sein des bâtiments.

L'essai à la phénolphtaléine est une méthode efficiente pour suivre la progression de la carbonatation du béton et déterminer la présence de béton carbonaté. Elle donne une indication de la profondeur de la carbonatation par rapport à la surface exposée du béton. Les résultats des essais thermogravimétriques correspondants montrent que la profondeur réelle de la carbonatation partielle du béton peut être de 10 à 20 mm de plus que ce qu'indiquent les essais à la phénolphtaléine.

5. RÉFÉRENCES

1. Bickley, J.A., «Extent of Carbonation in Buildings in Toronto», Société canadienne d'hypothèques et de logement, dossier n° 6710-12-1, 1989.

2. Verbeck, G.J., «Carbonation of Hydrated Portland Cement», ASTM Special Technical Publication No. 205, 1958, p. 17 à 36.

3. Wierig, H.J., «Long Time Studies on the Carbonation of Concrete Under Normal Outdoor Exposure», RILEM Seminar on Durability, Hannover, 1984.

4. Roberts, M.H., «Carbonation of Concrete Made with Dense Natural Aggregate», Building Research Establishment Information Paper IP6/81, avril 1981.

5. Parrott, L.J., «A Review of Carbonation in Reinforced Concrete», British Research Establishment, 1987.

6. Litvan, G.G. et A. Meyer, «Carbonation of Granulated Blast Furace Slag Cement Concrete During Twenty Years Of Field Exposure», actes de la Second International Conference On Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans In Concrete, Madrid, ACI SP-91, 1986, p. 1445 à 1462.

7. Ho, W.S. et R.K. Lewis, «Carbonation of Concrete Incorporating Fly Ash or a Chemical Admixture», ACI SP-79, Detroit, 1983, p. 333 à 346.

8. Buttler, F.G., M.H. Dectar, et G.R. Smith, «Studies on the Desiccation and Carbonation of Systems Containing Portland Cement and Fly Ash», ACI SP-79, Detroit, 1983, p. 67 à 381.

9. Potter, R. et W.S. Ho, «Quality of Cover Concrete and its Influence on Durability», ACI SP-100, Detroit, 1987, p. 423 à 445.

10. Matthews, J.D., «Carbonation of Ten-Year Old Concretes With and Without Added Pulverised-Fuel Ash», actes de la 2nd International Conference on Ash Technology and Marketing, Barbican Centre, London, England, 1984. Document sommaire 398a.

11. Schubert, P., «Carbonation Behaviour of Mortars and Concrete Made with Fly Ash», ACI SP-100, Detroit, 1987, p. 1945 à 1962.

12. Butler, W. et D. Baweja, «Long-Term Durability of Fly Ash Concretes in Civil Engineering Structures», ACI SP-100, Detroit, 1987, p. 519 à 540.

13. Samarin, A., R.L. Munn et J.B. Ashby, «The Use of Fly Ash in Concrete - Australian Experience», ACI SP-79, Detroit, 1983, p. 143 à 172.

14. Kasai, Y., I. Matsui, Y. Fukeshima et H. Kamohara, «Air Permeability and Carbonation of Blended Cement Mortars», ACI SP-79, Detroit, 1983, p. 435 à 451.

15. Fidjestol, P., «Reinforcement Corrosion and the Use of Condensed Silica Fume Additives», ACI SP-100, Detroit, 1987, p. 1445 à 1458.

16. Neville, A., «Why We have Concrete Durability Problems», ACI SP-100, Detroit, 1987, p. 21 à 30.

17. Slater, J.E., «Corrosion of Metals in Association with Concrete», ASTM STP 818, 1983, p. 15.

18. Roper, H., G. Kirkby et D. Baweja, «Long-Term Durability of Blended Cement Concretes in Structures», actes de la Second International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, ACI SP-91, 1986, p. 463 à 482.

19. Tuutti, K., «Corrosion of Steel in Concrete», Swedish Cement and Concrete Research Institute, rapport n° 4, 1982.

20. Kleinschmidt, H., «Untersuchung uber das Fortscheifen der Carbonatisierung an Betonbauwerken, Deut Aus Fur Stahlbeton, 1965, V170, p. 23 à 37.

21. ASTM, «Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete», C-876-87. Philadelphia, PA, ASTM, 1987.

22. «Règles de calcul des ouvrages en béton dans les bâtiments», norme CSA A23.3-1970, sous-section 5.2.8, p. 21.

23. Gunter, M., Th. Bier, et H. Hilsdorf, «Effect of Curring and Type of Cement on the Resistance of Concrete to Freezing in Deicing Salt Solutions», ACC SP-100, Detroit, 1987, p. 877 à 899.

ANNEXE A

PHASE III CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS

CMHC FILE NUMBER 6711-5

Test Protocol:

1. Scope of Work

The work shall be limited to testing core samples obtained from buildings selected in accordance with prescribed criteria. Five cities were selected for the follow-up to the Phase II CMHC Carbonation Study [1] that was conducted in Toronto. The selection of these cities was based upon their potential for carbonation, as reported in Phase I [4], their geographical distribution and the inventory of CMHC buildings in each city. The five cities are:

a) Halifax
b) Calgary
c) Edmonton
d) Vancouver
e) Victoria

The extent of carbonation in the core samples shall be tested using phenolphthalein and thermogravimetric test methods.

Concrete strength testing shall be included as a means of comparing concrete properties between sites.

2. Building Selection

The subject buildings shall have these characteristics:

.1 Constructed prior to 1975;

.2 Exterior cast-in-place concrete components accessible for coring as described in Section 4.0;

.3 Below average construction quality (i.e. the work shall include structures that are judged to have significant potential for carbonation on the basis local knowledge of construction practices and on the basis of visual examination of concrete quality).

3. Site Selection

The selection of core locations shall be based on the following requirements. The core samples from each city shall be:

.1 Obtained from locations where the external surface has not been previously damaged or repaired (no visible delamination or patches);

.2 Obtained from locations remote from salt splash;

.3 Obtained from the top surfaces of balconies and exposed reinforced concrete columns and shear walls. Distribute the cores among these components as evenly as possible;

.4 Distributed among all physical directions as evenly as possible (N, S, E and W).

4. Coring Procedure

Three cores shall be obtained at each location to constitute a valid scientific sample in accordance with the following procedure:

.1 50mm dia. x 75mm deep cores shall be obtained by diamond drill bit cooled with water; core locations shall be repaired to the satisfaction of the building Owner;

.2 The cores shall be identified and immersed in distilled water for transportation to the lab;

.3 The following information shall be recorded for each set of core samples:

- Date
- Location: Street Address
  Type of Component
  Elevation
  Orientation (N, S, E or W)
- Exposure to Weather (i.e. exposed or shielded)
- Age of Structure

.4 The total number of cores obtained in Victoria, Vancouver and Edmonton shall be thirty-six (36):

	4	Buildings/City
x	3	Samples/Building
x	3	Cores/Sample
=	36	Cores/City

.5 The total number of cores obtained in Calgary and Halifax shall be forty-eight (48):

	4	Buildings/City
x	4	Samples/Building
x	3	Cores/Sample
=	48	Cores/City

5. Laboratory Procedure

.1 The approximate tensile strength of two concrete specimens shall be calculated according to ASTM C406-86. Two of the three 50mm dia cores/sample shall be split along the longitudinal axis for this purpose.

.2 Following the splitting of each core, the unmarked half-core shall be identified and returned to storage in distilled water for future testing.

.3 The two remaining half-cores shall be tested to determine the depth of carbonation using standard phenolphthalein indicator solutions in accordance with the test procedure given in ISO Standard DOC N77E, except that only four depth measurements shall be made.

.4 The third core of each sample shall remain in storage for future testing UNLESS the results obtained from 6.3 are inconsistent (i.e. variance greater than ± 3mm). In this case, the third core would also be split and tested as described in 6.3 of this procedure.

.5 The two most carbonated and two least carbonated specimens from each City, as determined by phenolphthalein testing, shall be selected for further testing as follows;

a) The specimens shall be removed from the distilled water and packaged in sealed, air tight, plastic bags for transportation to Ottawa by courier;

b) The depth of carbonation shall be independently tested by the Institute for Research in Construction (IRC/NRC) using thermogravimetric analysis.

ANNEXE B

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Victoria, B.C.

Date Tested: Dec. 20/90

Building: CS

Year of Construction: 1967

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm) D avg.	D max.	Comments
CS 1.	Wall	13 m above ground. Suburban university area	East, exterior, protected from South only	a	6870	10	12	
				b	6420	11	16	
				c				Not tested
CS 2.	Wall	Ground level, 1.5 m above ground	North, exterior, exposed	a	4940	3	18	
				b	4380	12	19	
				c	7070	10	16	
CS 3.	Wall	1 m above ground	East, exterior, protected	a	6550	14	19	
				b	6630	17	20	
				c				Not tested
4.								

Tested By: DMS/DG

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Victoria, B.C.

Date Tested: Dec. 20/90

Building: (X)

Year of Construction: 1969

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm) D avg.	D max.	Comments
CO 1.	Wall	10 m above ground Suburban university area	Exterior, North, exposed	a	3300	11	17	
				b	3460	11	13	
				c				Not tested
CO 2.	Column	Ground level, 1 m above ground	Exterior, West, exposed	a	5890	1	1	
				b	5520	9	13	
				c	---	7	10	Split tensile test invalid
CO 3.	Column	Ground level, 1 m above ground	Exterior, protected, East	a	4590	16	18	
				b	3950	17	23	
				c				Not tested
4.								

Tested By: DMS/DG

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Victoria, B.C.

Date Tested: Dec. 20/90

Building: F

Year of Construction: 1976

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm) D avg.	D max.	Comments
F 1.	Slab on grade	Ground level. Suburban industrial/ commercial area	East, exterior, exposed	a	5840	0	0	
				b	8250	0	0	
				c				Not tested
F 2.	Slab on grade	Ground level	West, exterior, exposed	a	7800	1	1	
				b	7320	0	0	
				c				Not tested
F 3.	Suspended slab	Second Floor, 5 m above ground	Southwest, exterior, exposed	a	4920	0	0	
				b	6340	0	0	
				c				Not tested
4.								

Note: This building is located on a salt water foreshore. South side is exposed to the foreshore. Ground

Tested By: DMS/DG

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Victoria, B.C.

Date Tested: Sept. 28/90

Building: I.

Year of Construction: 1975

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm) D ave.	D max.	Comments
I. 1.	Wall	Parapet wall at main entrance, ground level. Rural area	South, exterior, exposed	a	7730	2	2	
				b	7450	2	2	
				c				Not tested
I. 2.	Wall	Stairwell, ground level	East, exterior, protected	a	4610	8	13	
				b	4400	6	11	
				c				Not tested
I. 3.	Column	Ground level	West, exterior, exposed	a	4000	13	14	
				b	2960	16	18	
				c				Not tested
4.								

Tested By: DMS/DG

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Vancouver, B.C.

Date Tested: Dec. 20/90

Building: RT

Year of Construction: 1971

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm) D avg.	D max.	Comments
RT1.	Balcony slab	16th Floor. Suburban residential/ commercial area	East protected, exterior	a	4910	1	5	4" in 5" slab
				b	4450	7	11	
				c	3440	1	2	
RT2.	Balcony slab	8th Floor	East protected, exterior.	a	2970	0	0	
				b	2760	0	0	
				c				Not tested
RT3.	Balcony slab	2nd Floor	East protected, exterior	a	4000	7	11	
				b	3100	6	8	
				c				Not tested
4.								

Tested By: DMS/DG

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Vancouver, B.C.

Date Tested: Dec. 20/90

Building: HT

Year of Construction: 1971

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm) D avg.	D max.	Comments
HT1.	Balcony slab	19th Floor. Wall developed residential/ commercial area	North, protected, exterior	a	5030	1	3	
				b	4390	2	6	
				c				Not tested
HT2.	Balcony slab	15th Floor	East, protected, exterior	a	4070	11	15	
				b	4880	7	10	
				c				Not tested
HT3.	Balcony slab	7th Floor	East, protected, exterior	a	5250	8	11	
				b	4720	8	15	
				c				Not tested
4.								

Tested By: DMS/DG

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Vancouver, B.C.

Date Tested: Sept. 27/90

Building: N

Year of Construction: 1969

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm) D avg.	D max.	Comments
N 1.	Elevator penthouse wall	Roof above 21st Floor, downtown area	South, exterior, protected, open to above	a	4430	26	28	
				b	4410	11	14	
				c	5510	22	24	
N 2.	Parapet wall	Entrance Canopy above driveway	Exterior, North, exposed	a	5510	5	6	
				b	6520	7	9	
				c				Not tested
N 3.	Wall	3.2 m above ground	Exterior, West, exposed	a	3560	15	17	
				b	3840	9	11	
				c	5150	11	12	
4.								

Tested By: DMS/DG

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Vancouver, B.C.

Date Tested: Sept. 27/90

Building: S

Year of Construction: 1975

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm) D avg.	D max.	Comments
S 1.	Elevator penthouse wall	Roof above 10th Floor, suburban resid-ential area	East, exterior, exposed	a	3510	16	20	
				b	3380	13	17	
				c				Not tested
S 2.	Wall	Ground Floor, 1.5 m above ground	North, exterior, sheltered from West	a	5490	2	4	
				b	6680	2	2	
				c				Not tested
S 3.	Topping on suspended slab	Ground level	Exterior, West side, exposed	a	5770	2	2	
				b	4590	1	1	
				c				Not tested
4.								

Tested By: DMS/DG

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Edmonton

Date Tested: 01/02/91

Building: E/VA - Non CMHC Building

Year of Construction: 1971

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm)	Comments
1.	Column	5 m above ground	South Exposed	E/VA/C1			Stored
				E/VA/C2	3761	15.64	
				E/VA/C3	4525	15.60	
2.	Column	5 m above ground	North Exposed	E/VA/N1	4468	10.13	
				E/VA/N2			Stored
				E/VA/N3	3693	8.68	
3.	Slab	5 m above ground	Upward Exposed East Side	E/VA/S1	3366	0	
				E/VA/S2			Stored
				E/VA/S3	3941	0	
4.							

Tested By: Mel Schmidt
Hardy BBT Limited - Edmonton

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS.
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Edmonton

Date Tested: 18/01/91

Building: E-SP - Non CMHC Building

Year of Construction: 1971

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm)	Comments
1.	Roof Slab	12 m above ground	Upward Exposed South Side	E/SP/S-1	4518	11.52	
				E/SP/S-2	5130	9.25	
				E/SP/S-3			Stored
2.	Shear Wall	11 m above ground	West Exposed	E/SP/SW-1	3938	11.86	
				E/SP/SW-2			Stored
				E/SP/SW-3	4193	9.24	
3.	Column	11 m above ground	North Exposed	E/SP/C-1			Stored
				E/SP/C-2	5691	4.36	
				E/SP/C-3	5014	4.24	
4.							

Tested By: Mel Schmidt
Hardy BBT Limited - Edmonton

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Edmonton

Date Tested: 19/09/90

Building: E/V - Non CMHC Building

Year of Construction: 1968

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm)	Comments
1.	Shear Wall	3 m above ground	South Exposed	E/V/W-1S	2525	36.0	
				E/V/W-2S			Stored
				E/V/W-3S	2456	35.9	
2.	Shear Wall	3 m above ground	East Exposed	E/V/W-1E	3553	27.0	
				E/V/W-2E	3162	27.4	
				E/V/W-3E			Stored
3.	Shear Wall	3 m above ground	North Exposed	E/V/W-1N	4575	17.0	
				E/V/W-2N	2953	17.2	
				E/V/W-3N			Stored
4.							

Tested By: Mel Schmidt
Hardy BBT Limited - Edmonton

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Edmonton

Date Tested: 19/09/90

Building: E/CH - Non CMHC Building

Year of Construction: 1969

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm)	Comments
1.	Column	1.2 m above ground	South Exposed	E/CH/C-1S			Stored
				E/CH/C-2S	5183	10.8	
				E/CH/C-3S	5934	10.2	
2.	Column	2.4 m above ground	East Exposed	E/CH/C-1E	7208	2.0	
				E/CH/C-2E			Stored
				E/CH/C-3E	8392	3.0	
3.	Foundation Wall	0.3 m above ground	South Exposed	E/CH/W-5S	3799	17.0	
				E/CH/W-6S			Stored
				E/CH/W-7S	4156	15.3	
4.							

Tested By: Mel Schmidt

Hardy BBT Limited - Edmonton

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Calgary

Date Tested: 22/01/91

Building: C/R - Non CMHC Building

Year of Construction: 1973

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm)	Comments
1.	Wall	2 m above ground	East Exposed	C/R/EW-1	4614	13.35	
				C/R/EW-2	5333	14.27	
				C/R/EW-3			Stored
2.	Column	10 m above ground	North Exposed	C/R/C-1	5332	9.29	
				C/R/C-2	5532	10.86	
				C/R/C-3			Stored
3.	Wall	1 m above ground	West Shielded	C/R/WW-1			Stored
				C/R/WW-2	5563	13.16	
				C/R/WW-4	5573	11.92	
4.	Slab	Ground level	Upward Exposed North Side	C/R/S-1	4293	9.69	
				C/R/S-2	4485	9.16	
				C/R/S-3			Stored

Tested By: Yoga Yogendran

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Calgary

Date Tested: 21/01/91

Building: C/F - Non CMHC Building

Year of Construction: 1973

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm)	Comments
1.	Slab	3 m above ground	Upward Exposed Ease Side	C/F/S-1	6002	1.98	
				C/F/S-2			Stored
				C/F/S-3	3346	1.71	
2.	Column	1 m above ground	West Exposed	C/F/FW-1	3233	5.87	
				C/F/FW-2			Stored
				C/F/FW-3	3692	4.19	
3.	Shear Wall	20 m above ground	East Exposed	C/F/EW-T1	5336	13.08	
				C/F/EW-T2			Stored
				C/F/EW-T3	6489	12.65	
4.	Wall	3 m above ground	East Exposed	C/F/EW-2	3726	15.57	
				C/F/EW-3			Stored
				C/F/EW-4	4787	15.81	

Tested By: Yoga Yogendran
Hardy BBT Limited - Calgary

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Calgary

Date Tested: 21/09/90

Building: C/E - CMHC Building

Year of Construction: 1976

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm)	Comments
1.	Shear Wall	5 m above ground	North Exposed	C/E/SW-1N	3351	15.6	
				C/E/SW-2N			Stored
				C/E/SW-3N	4012	15.3	
2.	Balcony Wall	5 m above ground	South Shielded	C/E/BW-1S	1603	24.9	
				C/E/BW-2S	3682	22.5	
				C/E/BW-3S			Stored
3.	Balcony Slab	14 m above ground	Upward Exposed North Side	C/E/BS-1	3226	0	
				C/E/BS-2			Stored
				C/E/BS-3	3023	0	
4.	Column	1.5 m above ground	South Exposed	C/E/C-1S	991	32.5	
				C/E/C-2S			Stored
				C/E/C-3S	1188	29.8	

Tested By: Yoga Yogendran
Hardy BBT Limited - Calgary

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Calgary

Date Tested: 21/09/90

Building: C/P - Non CMHC Building

Year of Construction: 1966

Sample No.	Component	Sample Location/ Elevation	Exposure	Core No.	Splitting Tensile Strength (KPa)	Depth of Carbonation (mm)	Comments
1.	Column	2 m above ground	West Exposed	C/P/C-1W	3218	15.0	
				C/P/C-2W	4118	16.3	
				C/P/C-4W			Stored
2.	Balcony Wall	4 m above ground	South Shielded	C/P/BW-1S	5910	18.1	
				C/P/BW-2S			Stored
				C/P/BW-3S	4213	15.8	
3.	Balcony Slab	2 m above ground	Upward Exposed West Side	C/P/S-1			Stored
				C/P/S-2	3271	0	
				C/P/S-4	4788	0	
4.	Shear Wall	1.5 m above ground	East Exposed	C/P/SW-1E	6176	16.7	
				C/P/SW-2E			Stored
				C/P/SW-3E	5447	18.0	

Tested By: Yoga Yogendran

Hardy BBT Limited - Calgary

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Halifax, Nova Scotia

Date Tested: 91/01/08

Building: 6653-D

Year of Construction: 1975

SAMPLE NO.	COMPONENT	SAMPLE LOCATION/ ELEVATION	EXPOSURE	CORE NO.	SPLITTING TENSILE STRENGTH (kPa)	DEPTH OF CARBONATION (mm)	COMMENTS
1	Wall	8m above grade West Elevation	Exposed Vertical Surface	1	3360	1	
				2	3510	1	
2	Parapet Wall	4.5m above grade South Elevation	Exposed Vertical Surface	1	2600	3	
				2	2960	4	
3	Wall	0.9m above grade, South Elevation	Exposed Vertical Surface	1	4300	9	
				2	3190	10	
4	Wall	0.9m above grade, North Elevation	Exposed Vertical Surface	1	2640	2	
				2	3070	3	

Tested By: W.S. Langley & Associates Limited

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Halifax, Nova Scotia

Date Tested: 90/09/25

Building: [illegible]

Year of Construction. 1968

SAMPLE NO.	COMPONENT	SAMPLE LOCATION/ ELEVATION	EXPOSURE	CORE NO.	SPLITTING TENSILE STRENGTH (kPa)	DEPTH OF CARBONATION (mm)	COMMENTS
1	Column	2m above grade North End of Building	Sheltered Exterior Exposure	3	3880	10	
				4	2970	10	
2	Column	2m above grade South End of Building	Sheltered Exterior Exposure	6	2870	18	
				7	2710	20	
3	Spandrel Beam	3.5m above grade, South Elevation	Exposed Vertical Surface	1	4220	1	
				2	3990	1	
4	Spandrel Beam	2.5m above grade, North Elevation	Exposed Vertical Surface	2	2260	2	
				3	3260	1	

Tested By: W.S. Langley & Associates Limited

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Halifax, Nova Scotia

Date Tested: 90/09/20

Building: [illegible]

Year of Construction: 1930 - 1935

SAMPLE NO.	COMPONENT	SAMPLE LOCATION/ ELEVATION	EXPOSURE	CORE NO.	SPLITTING TENSILE STRENGTH (kPa)	DEPTH OF CARBONATION (mm)	COMMENTS
1	Parapet Wall Cap	15m above grade	Exposed Horizontal Surface	1	2310	1	
				2	2530	None	
2	Parapet Wall Cap	15m above grade South Elevation	Exposed Horizontal Surface	1	1900	8	
				2	1770	10	
3	Foundation Wall	1.2m above grade, West Elevation	Exposed Vertical Surface	1	1200	15	See below.
				2	1150	23	
				3	1220	16	
4	Foundation Wall	1.0m above grade, East Elevation	Exposed Vertical Surface	1	1680	11	
				2	2190	10	

Carbonation indicated to a depth of 40 mm along one side of core which appeared to be located immediately above a construction joint not visible prior to coring.

Tested By: W.S. Langley & Associates Limited

CARBONATION IN CANADIAN BUILDINGS
CMHC FILE NO. 6711-5

City: Halifax, Nova Scotia

Date Tested: 90/09/19

Building: [illegible]

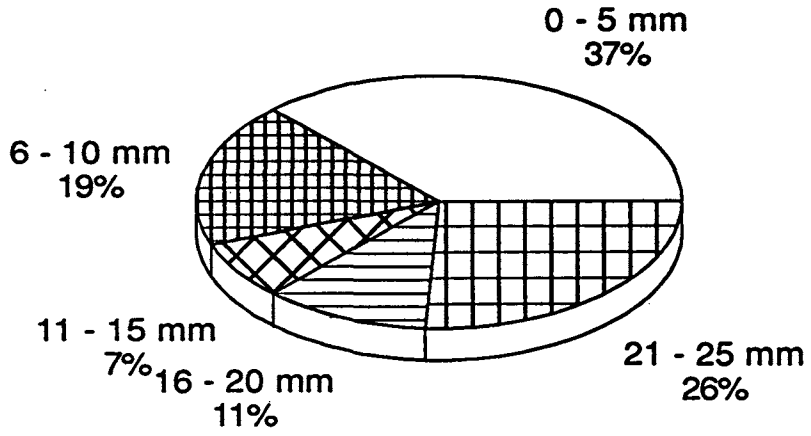
Year of Construction: 1964

SAMPLE NO.	COMPONENT	SAMPLE LOCATION/ ELEVATION	EXPOSURE	CORE NO.	SPLITTING TENSILE STRENGTH (kPa)	DEPTH OF CARBONATION (mm)	COMMENTS
1	Foundation Wall	0.8m above grade West Elevation	Exposed Vertical Surface	1	1380	25	
				2	1380	21	
				3	1380	25	
2	Cast in place Concrete Doorway Canopy	3.0m above grade West Elevation	Exposed Horizontal Surface	1	1780	None	
				2	1850	None	
3	Foundation Wall	0.3m above grade East Elevation	Exposed Vertical Surface	1	1530	21	
				2	1690	25	
				3	1380	25	
4	Balcony	5th storey, East Elevation	Exposed Horizontal Surface	1	1130	1	
				2	1530	1	

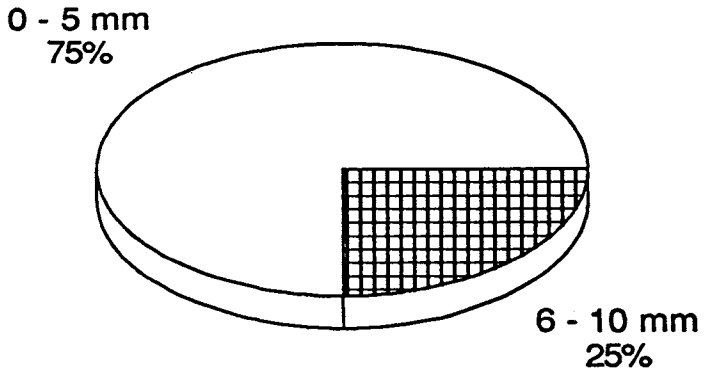
Tested By: W.S. Langley & Associates Limited

ANNEXE C

Figure 1A
Repartitions des profondeurs de carbonatation - Halifax

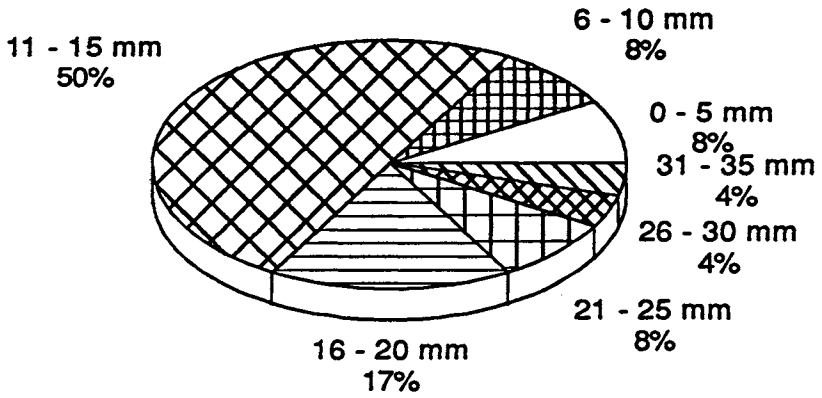


Echantillons Verticaux (27)

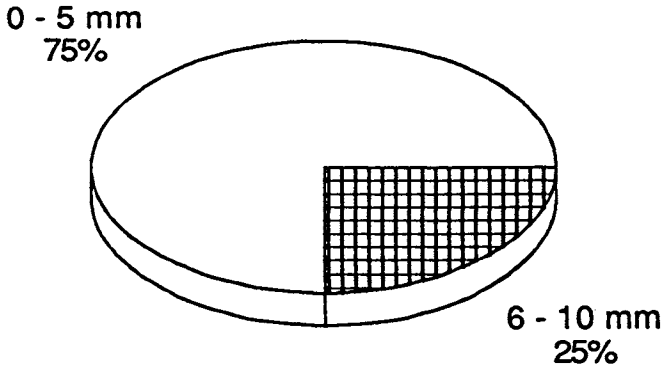


Echantillons horizontaux (8)

Figure 1B
Repartition des profondeurs de carbonatation - Calgary

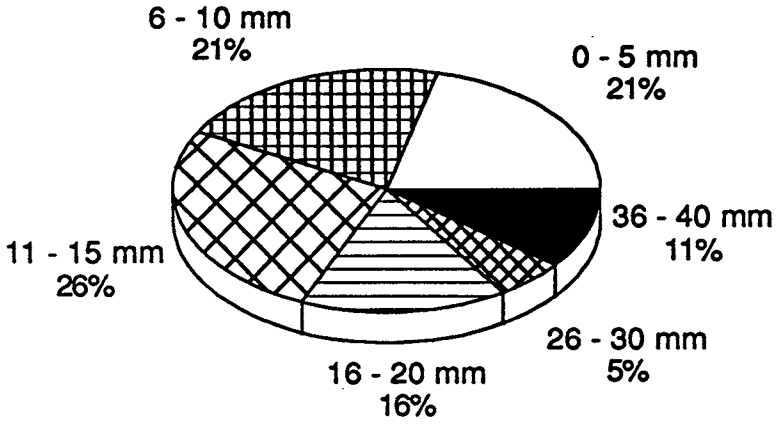


Echantillons verticaux (24)

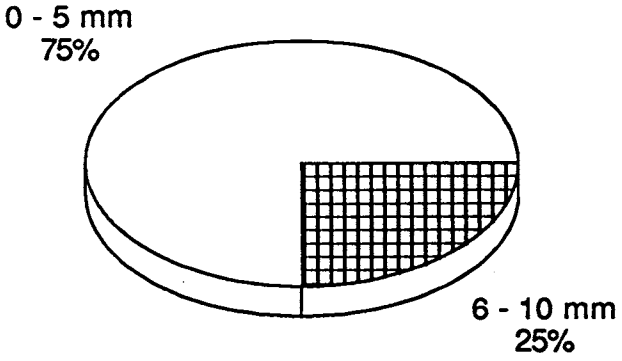


Echantillons horizontaux (8)

Figure 1C
Repartition des profondeurs de carbonatation - Edmonton

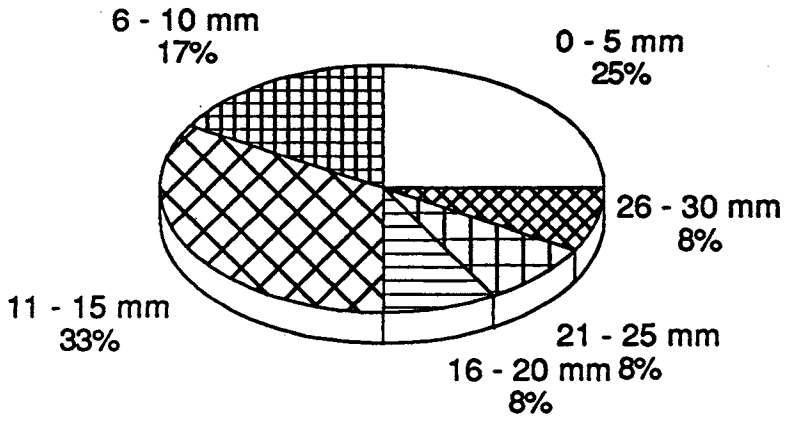


Echantillons verticaux (20)

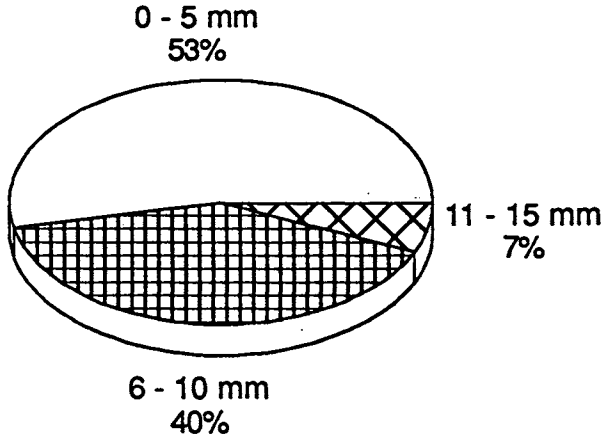


Echantillons horizontaux (4)

Figure 1D
Repartition des profondeurs de carbonatation - Vancouver

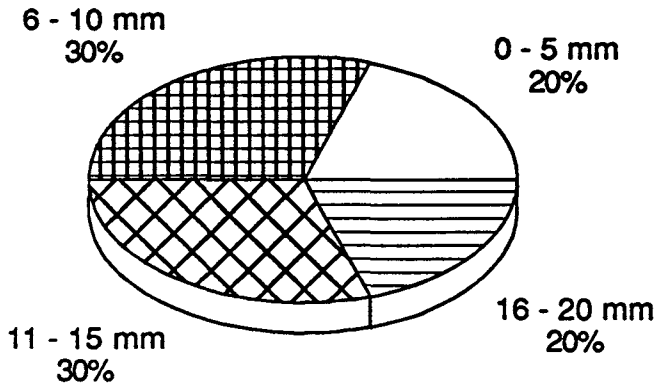


Echantillons verticaux (12)

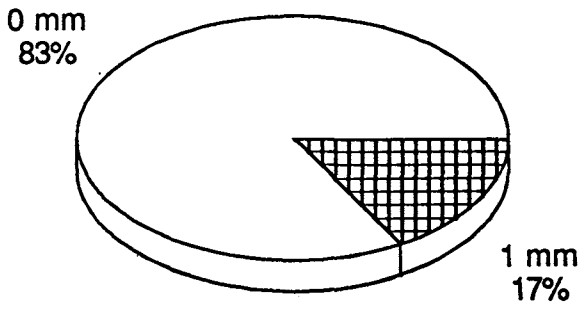


Echantillons horizontaux (15)

Figure 1E
Repartition des profondeurs de carbonatation - Victoria



Echantillons verticaux (20)



Echantillons horizontaux (6)

ANNEXE D

Figure 2A
Profondeur de la carbonatation par rapport a l'orientation de l'exposition - Halifax

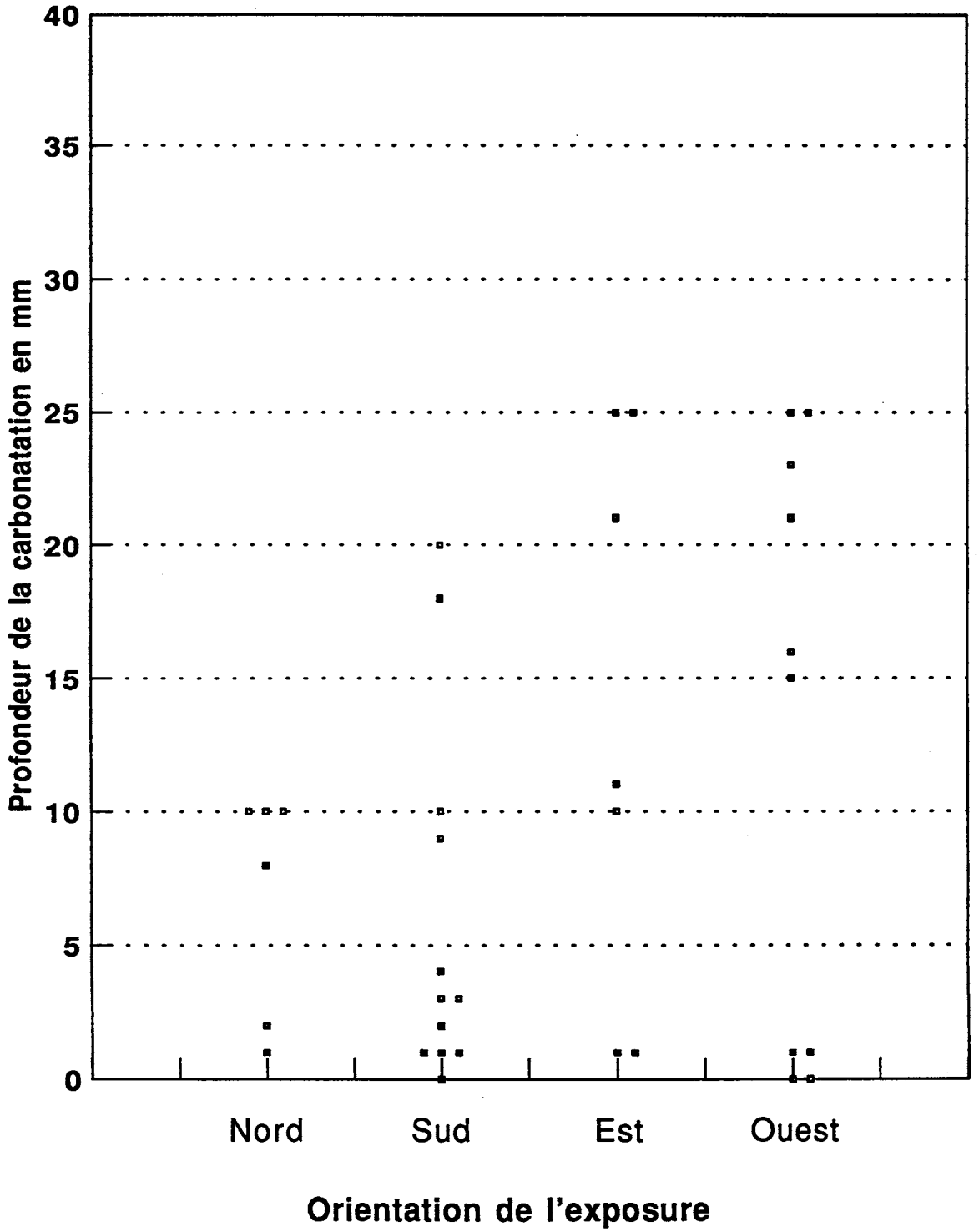


Figure 2B
Profondeur de la carbonatation par rapport a l'orientation de l'exposition - Calgary

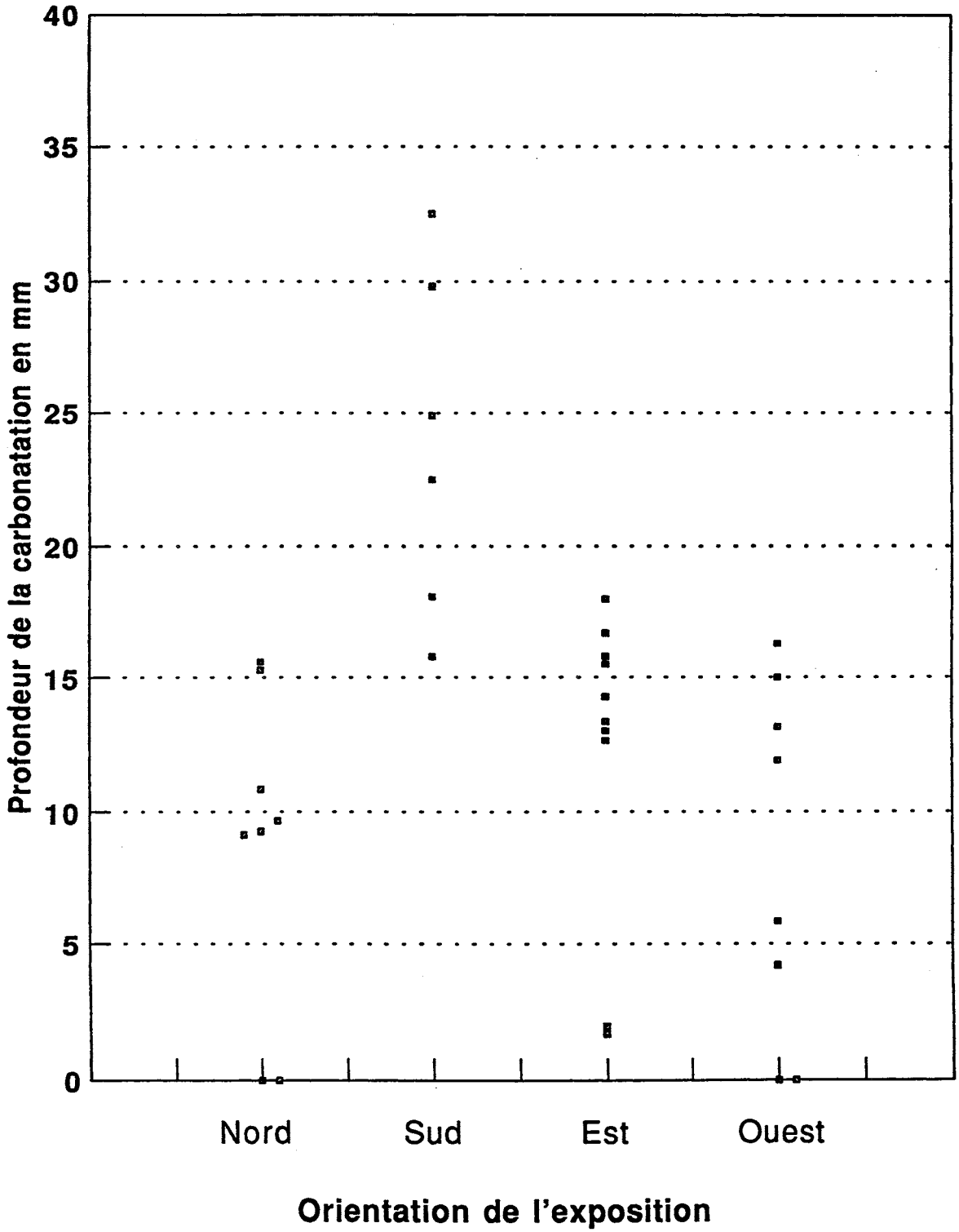


Figure 2C
Profondeur de la carbonatation par rapport a l'orientation de l'exposition - Edmonton

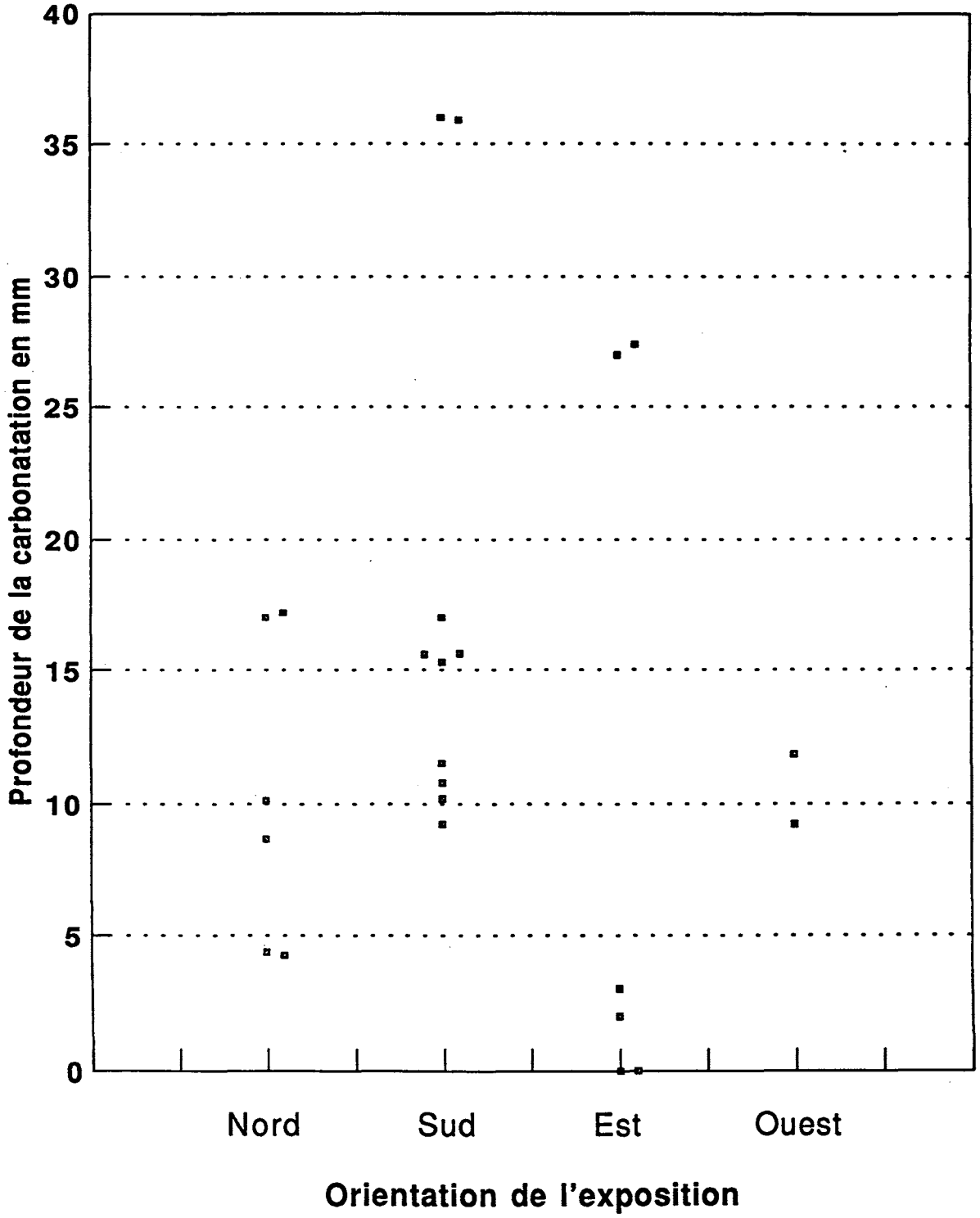


Figure 2D
Profondeur de la carbonatation par rapport a l'orientation de l'exposition - Vancouver

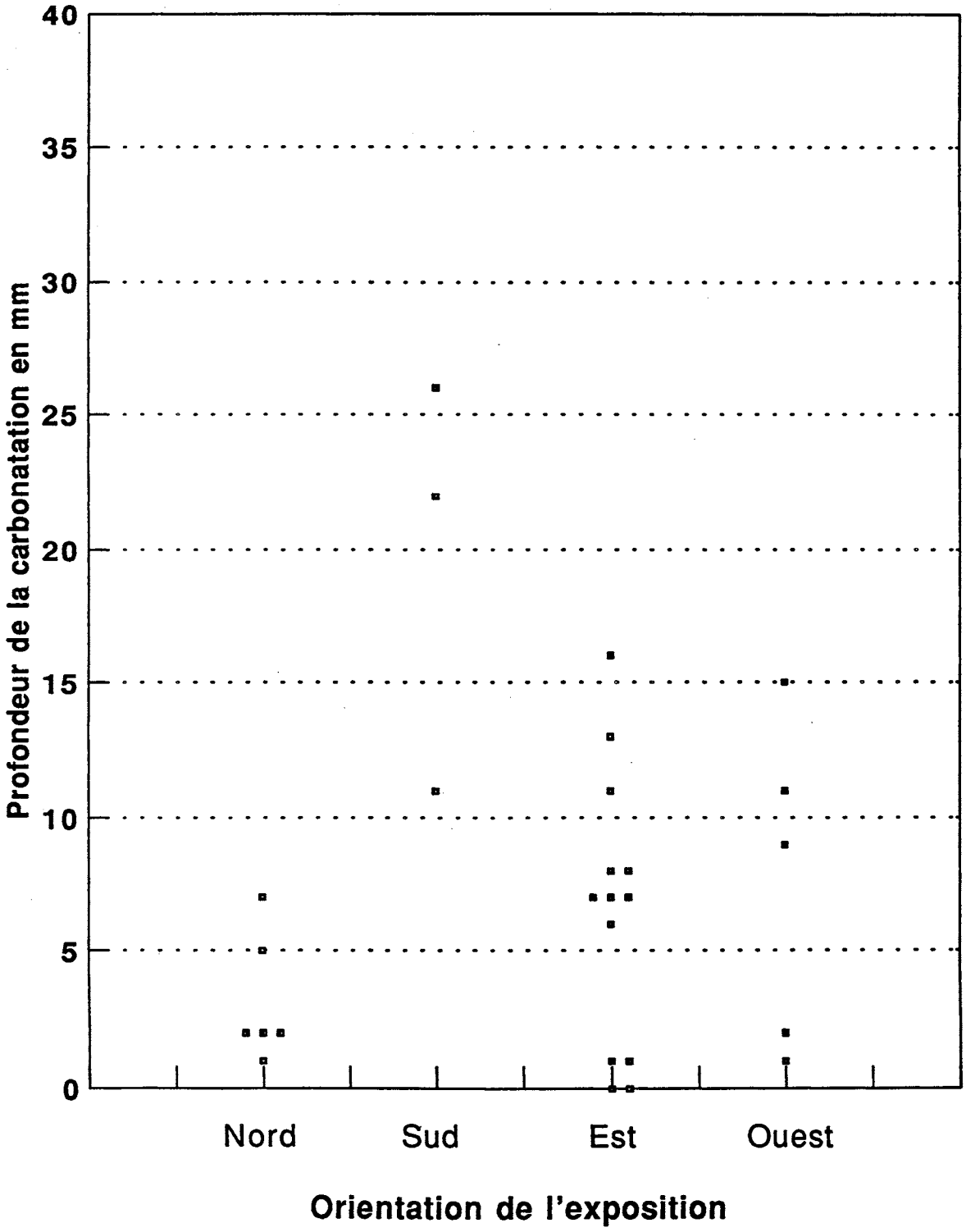
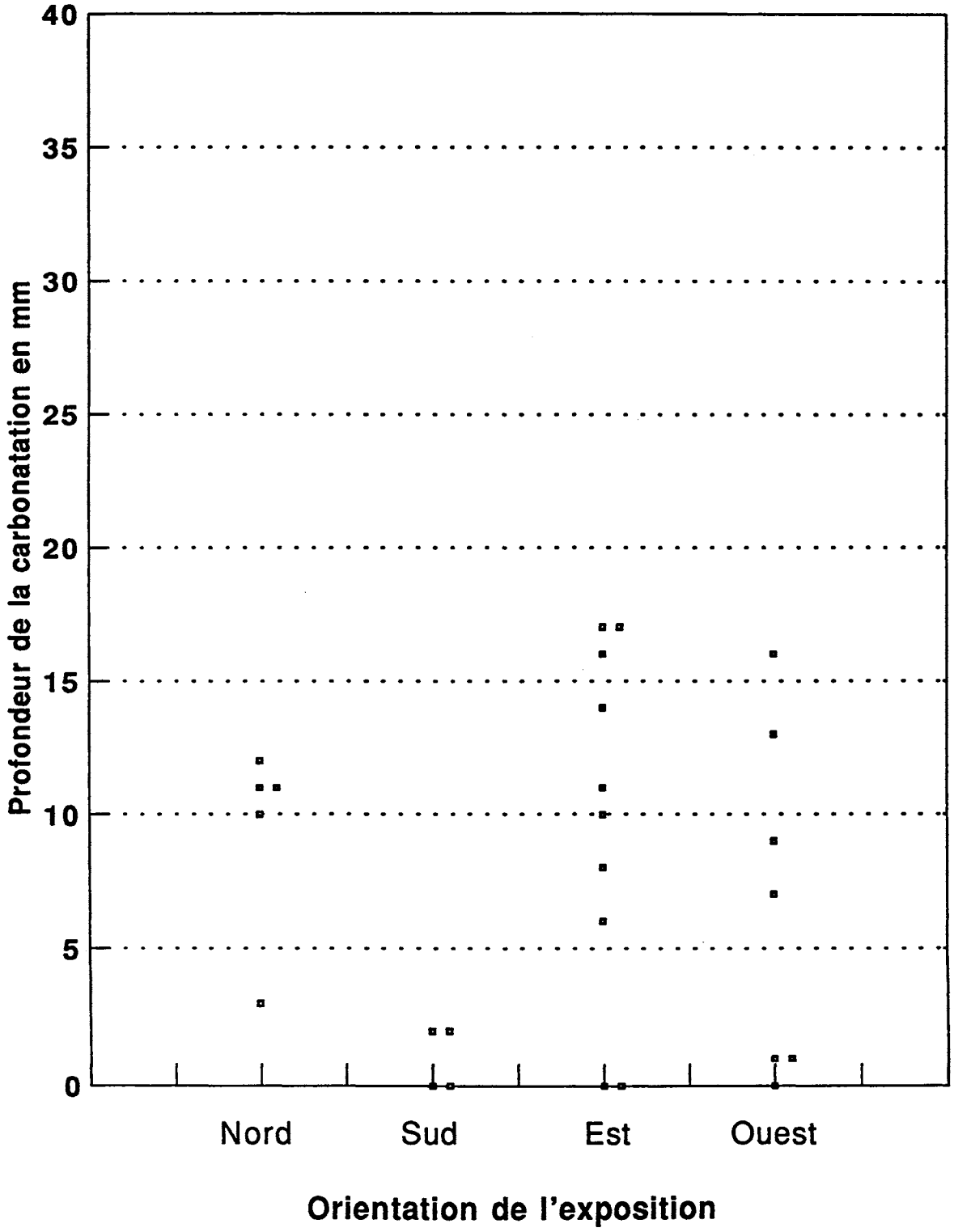


Figure 2E
Profondeur de la carbonatation par rapport a l'orientation de l'exposition - Victoria



ANNEXE E

Figure 3A
Profondeur de la carbonatation par rapport a la hauteur - Halifax

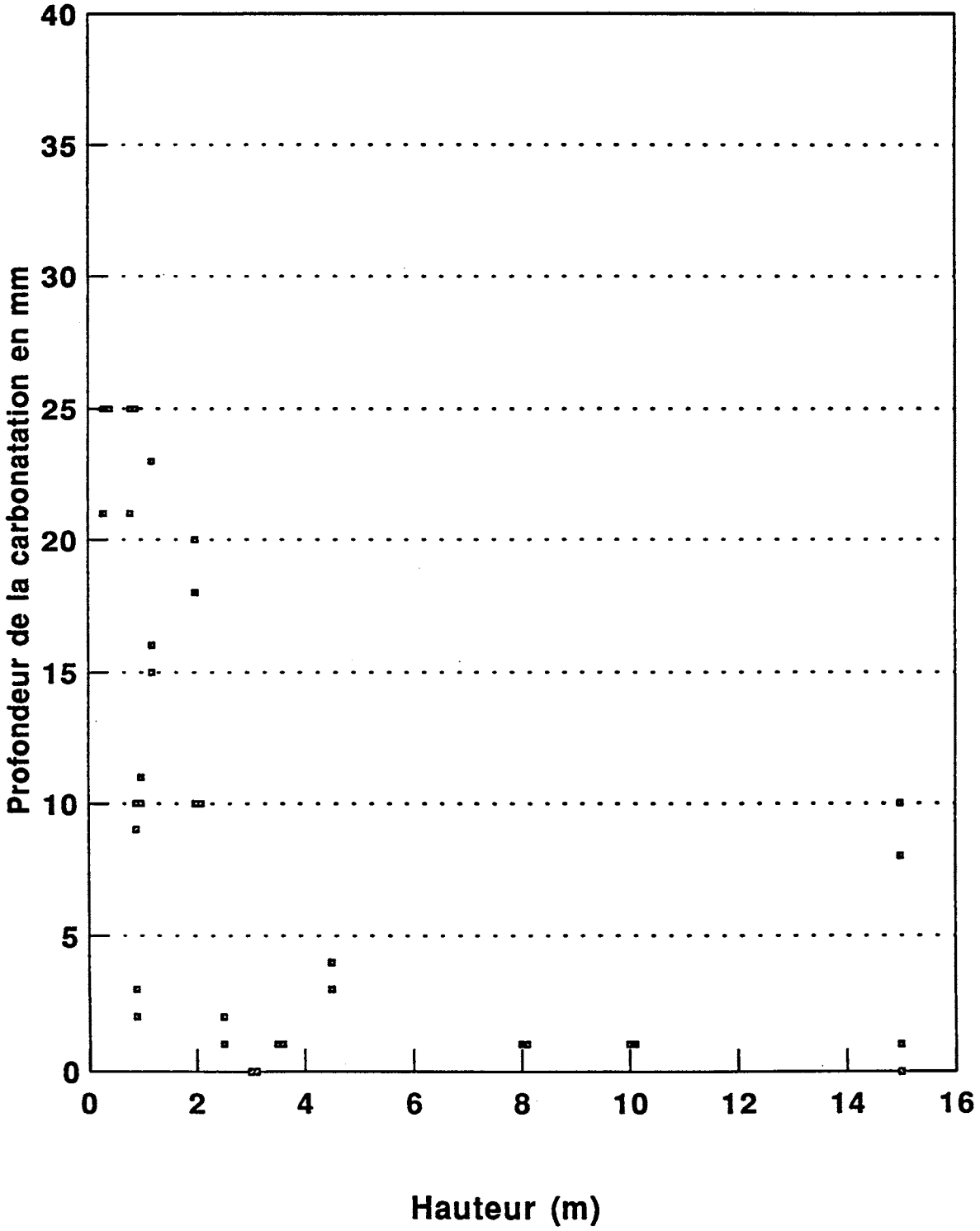


Figure 3B
Profondeur de la carbonatation par rapport a la hauteur - Calgary

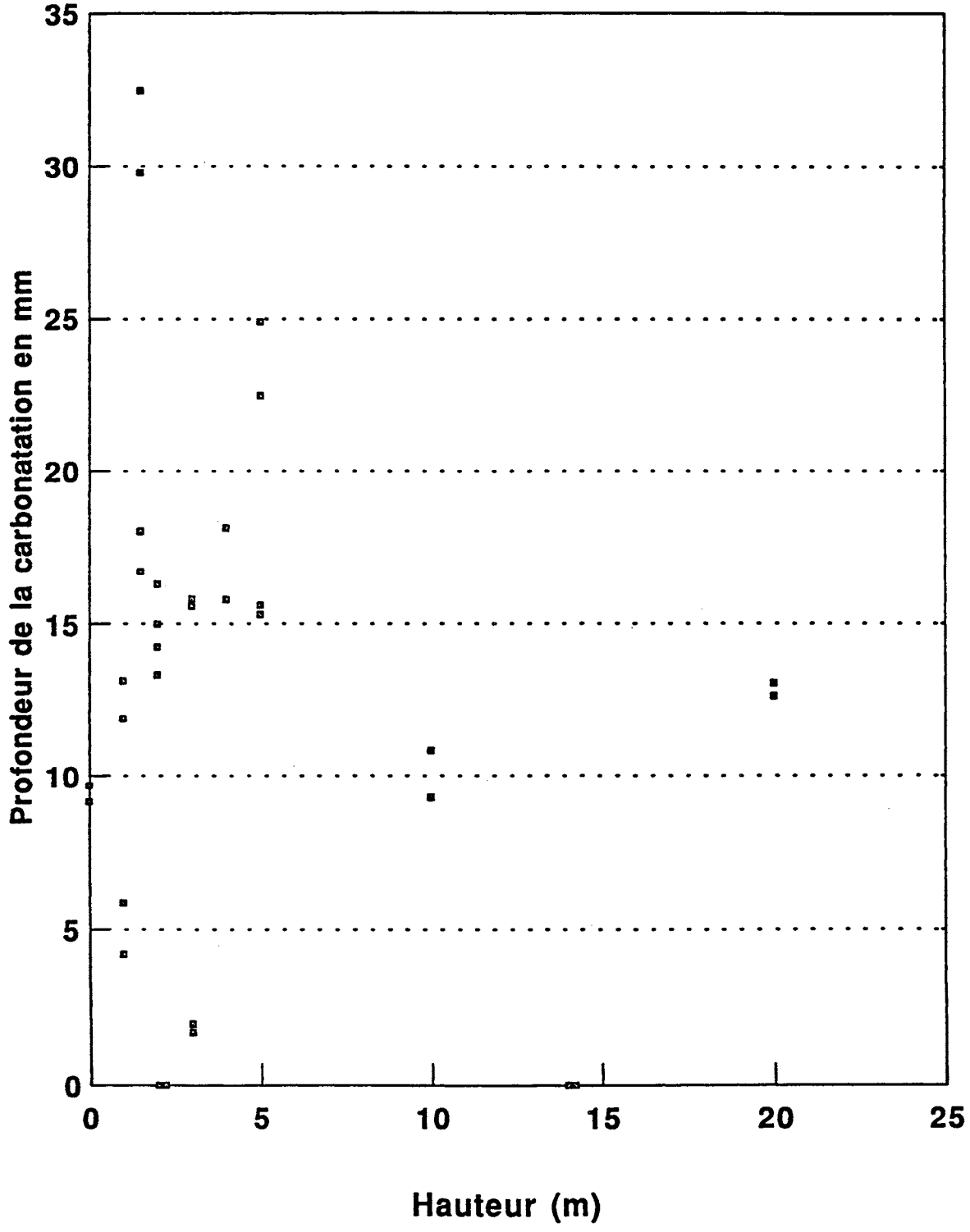


Figure 3C
Profondeur de la caronatation par rapport a la hauteur - Edmonton

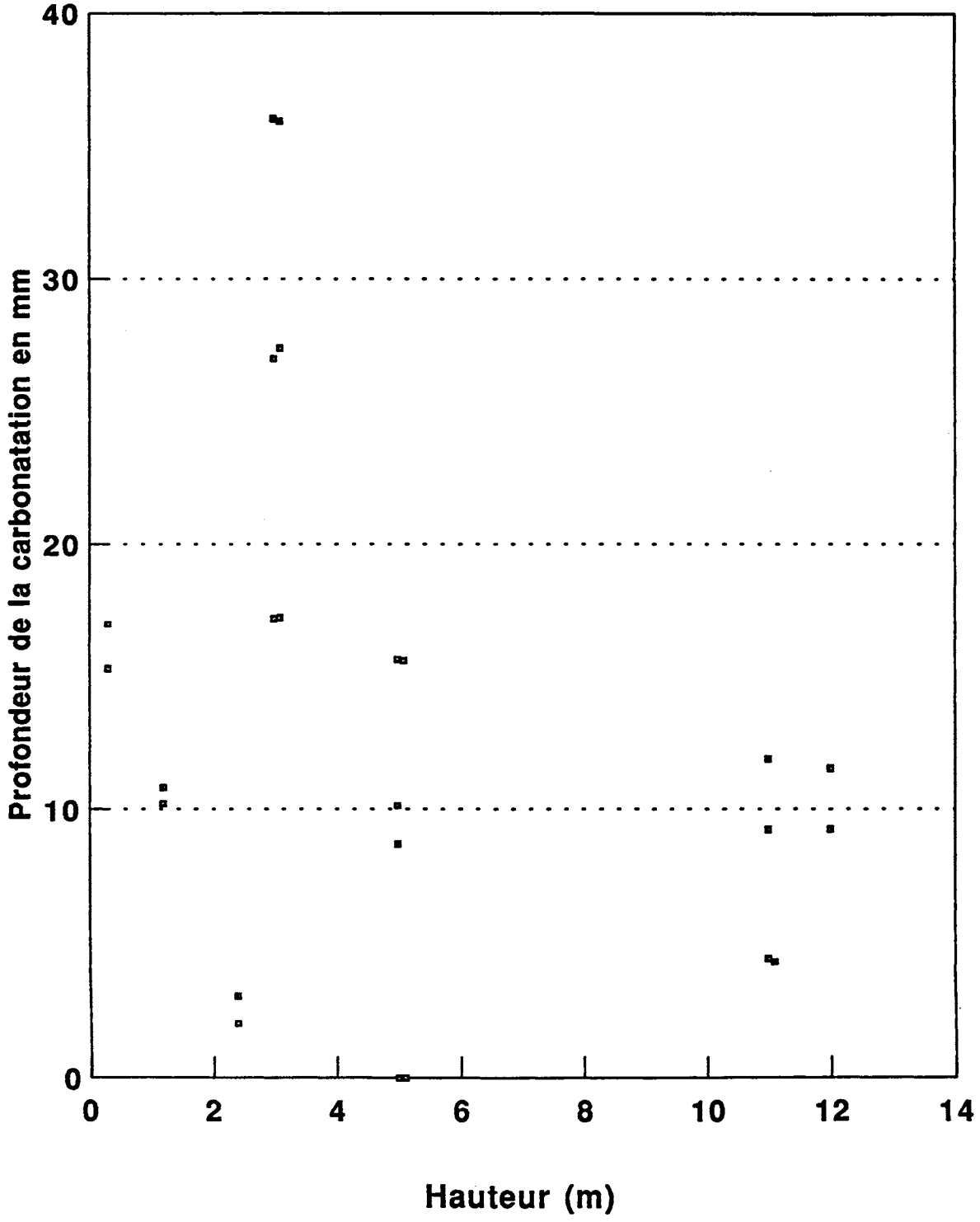


Figure 3D
Profondeur de la carbonatation par rapport a la hauteur - Vancouver

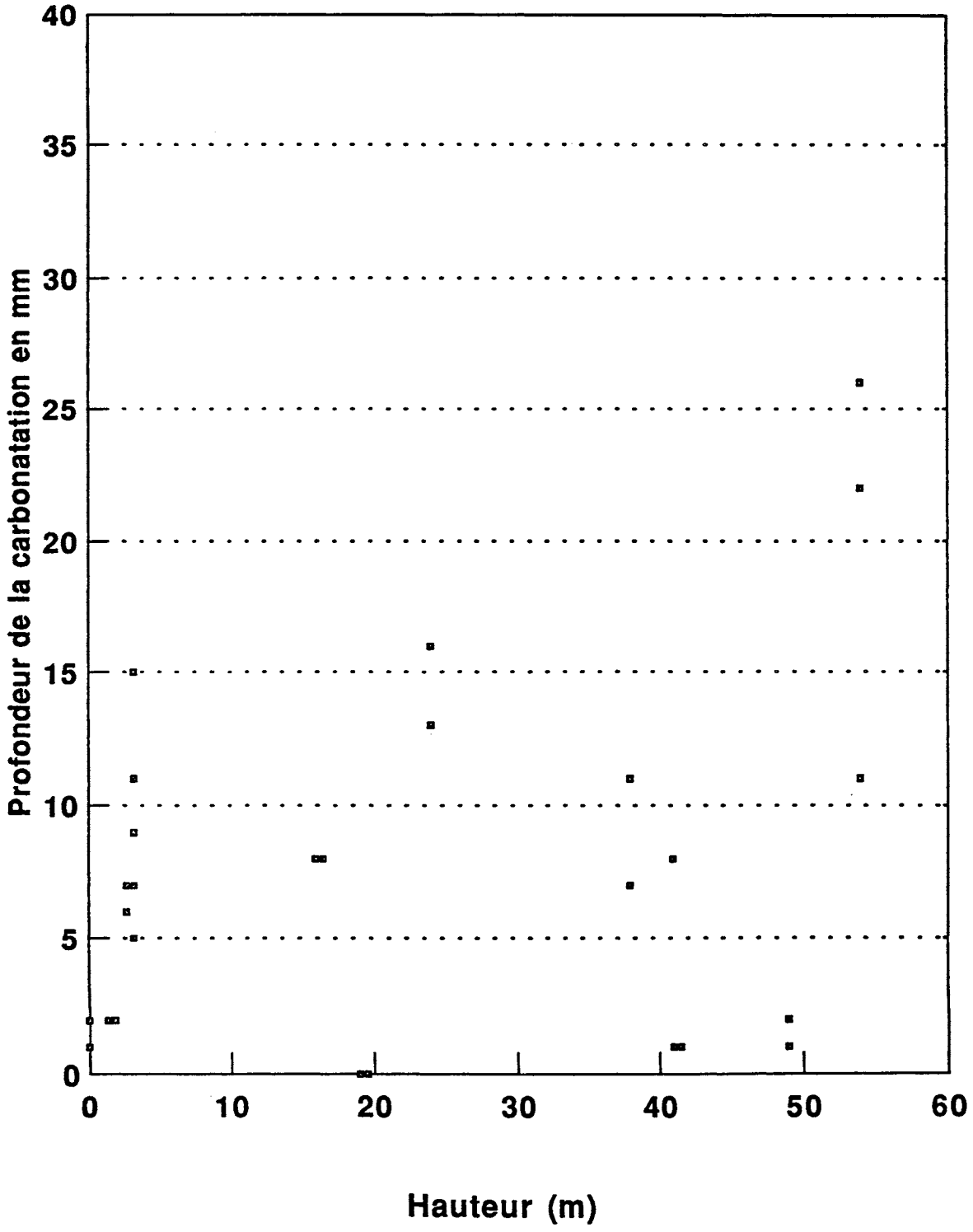
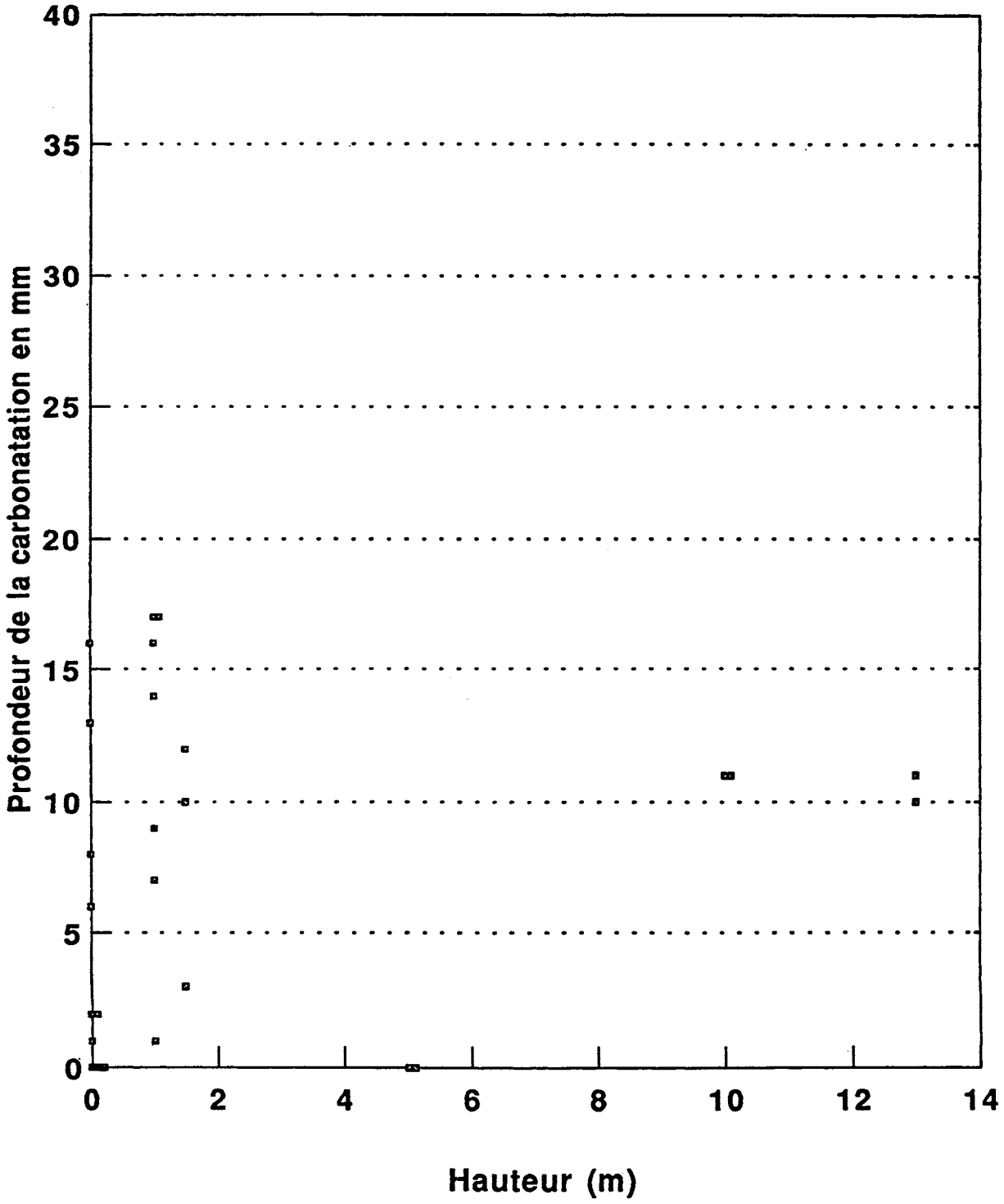


Figure 3E
Profondeur de la carbonatation par rapport a la hauteur - Victoria



ANNEXE F

Figure 4A
Profondeur de la carbonatation par rapport a la resistance a la traction par fendage - Halifax

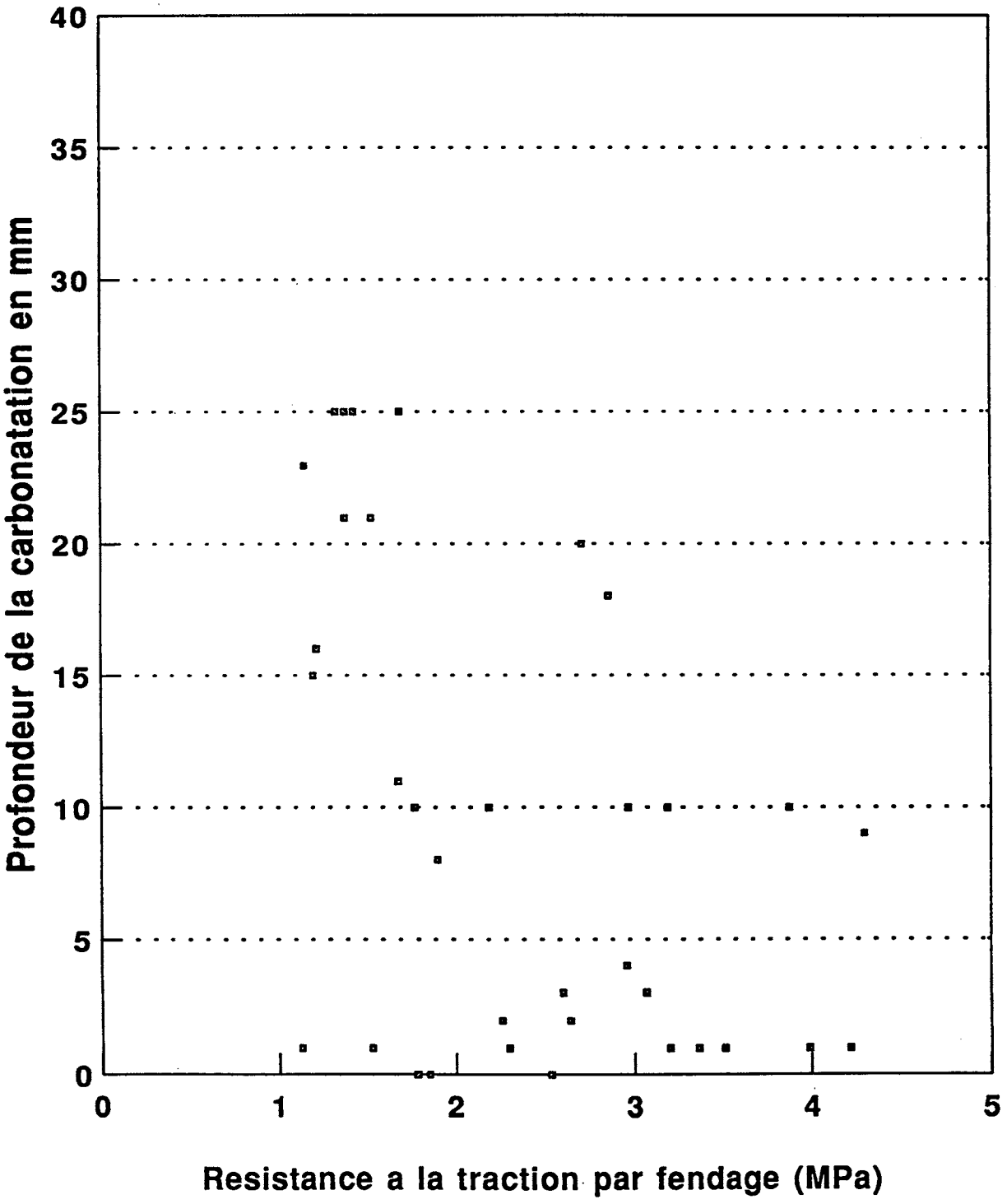


Figure 4B
Profondeur de la carbonatation par rapport a la resistance a la traction par fendage - Calgary

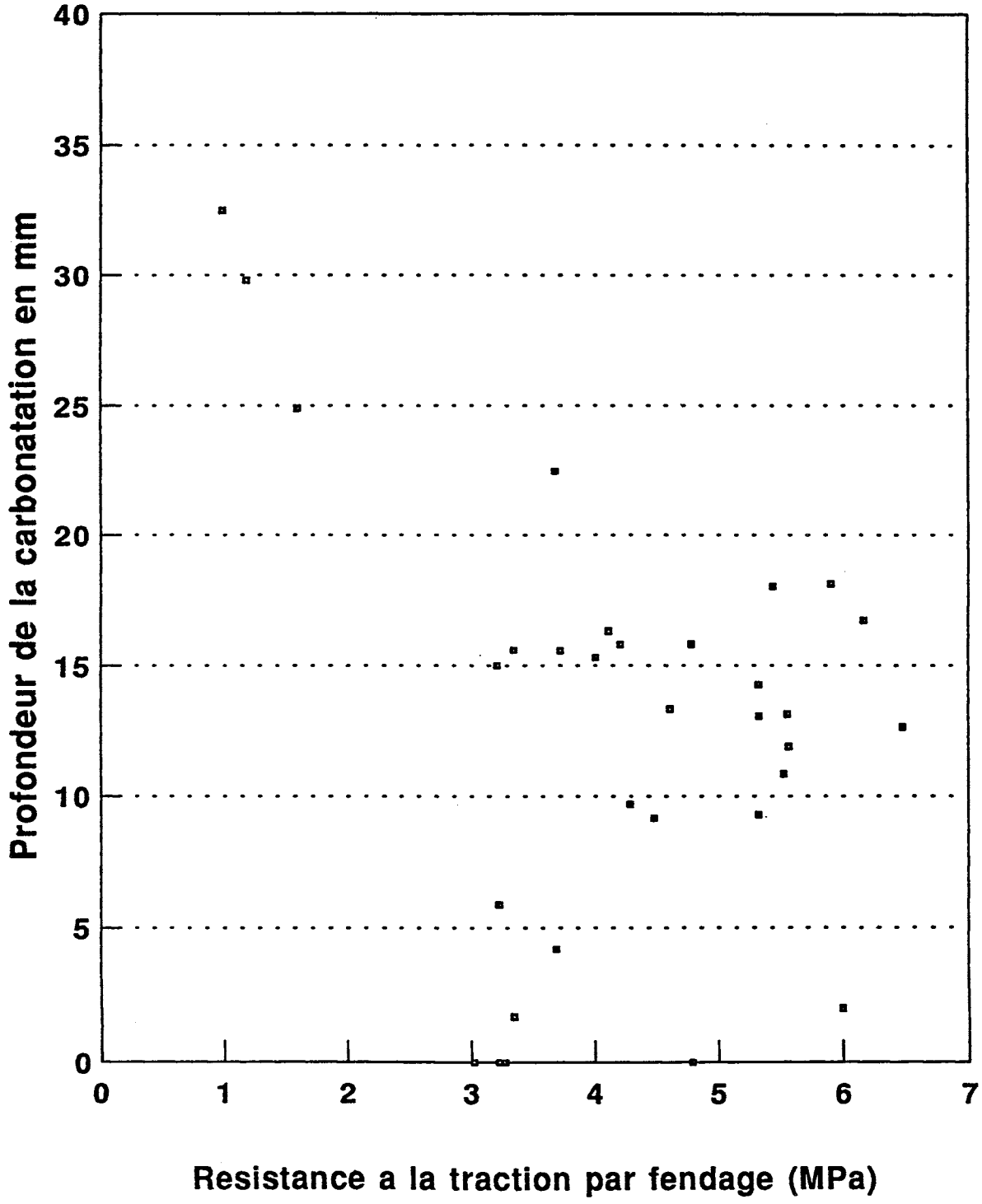


Figure 4C
Profondeur de la carbonatation par rapport a la resistance a la traction par fendage - Edmonton

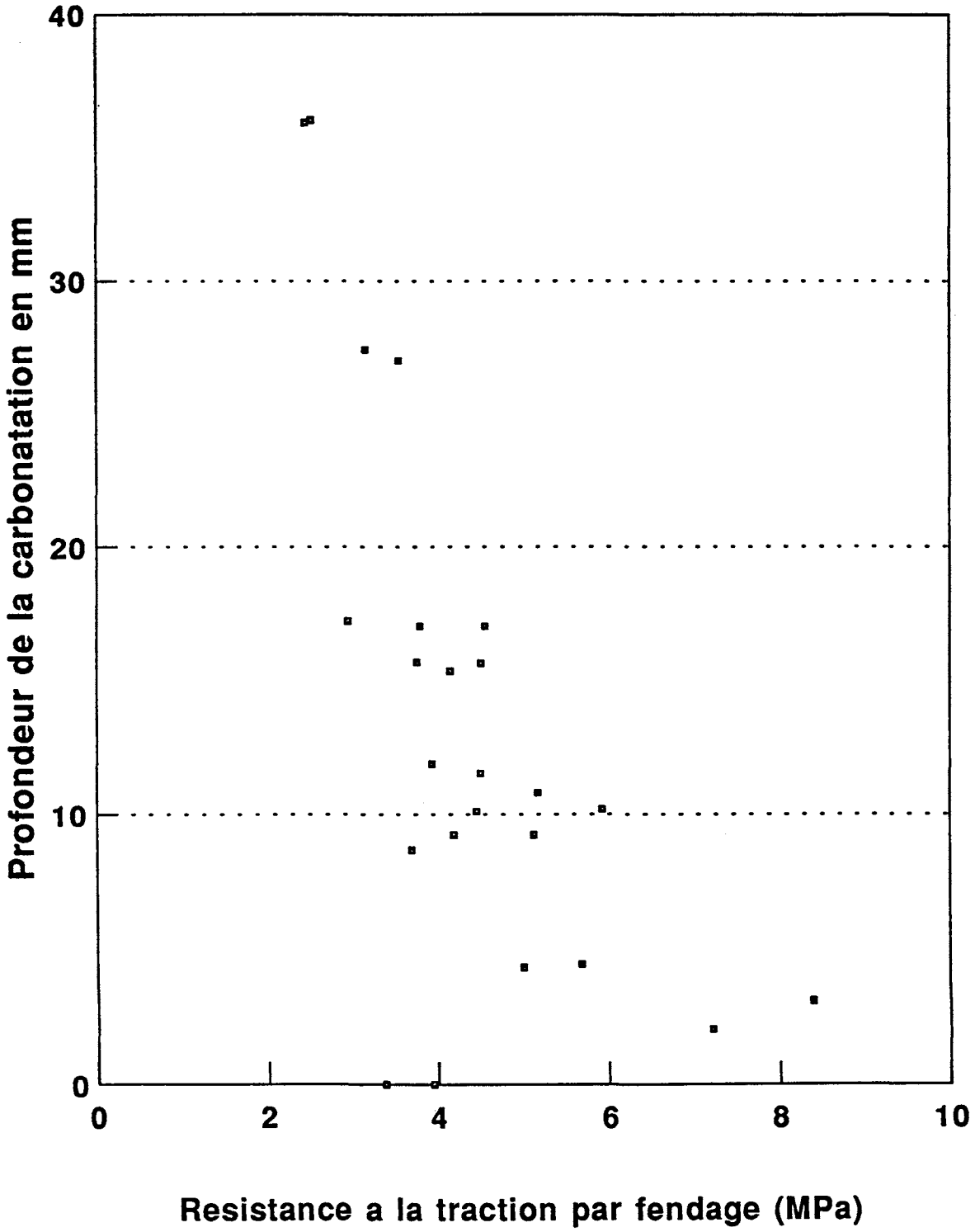


Figure 4D
Profondeur de la carbonatation par rapport a la resistance a la traction par fendage - Vancouver

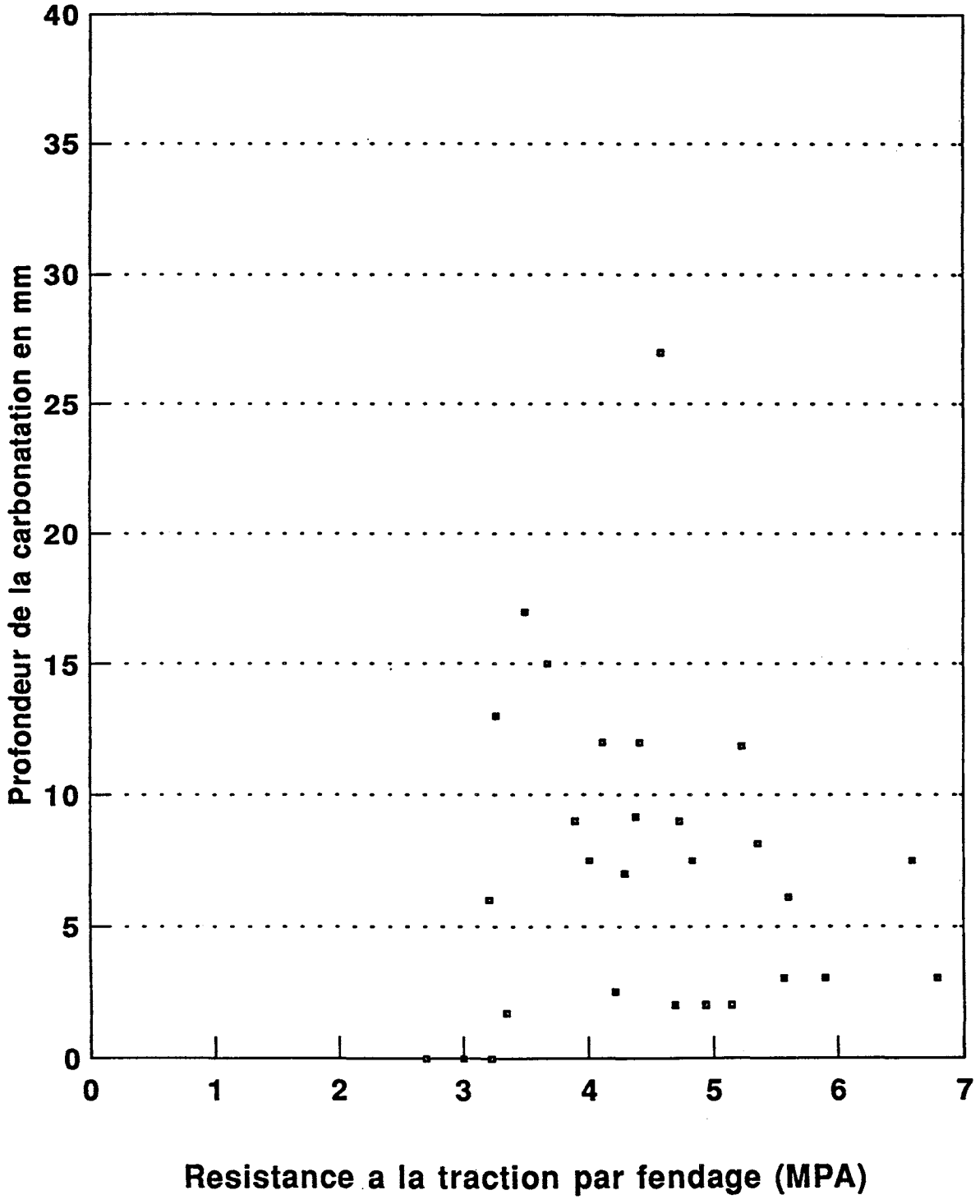
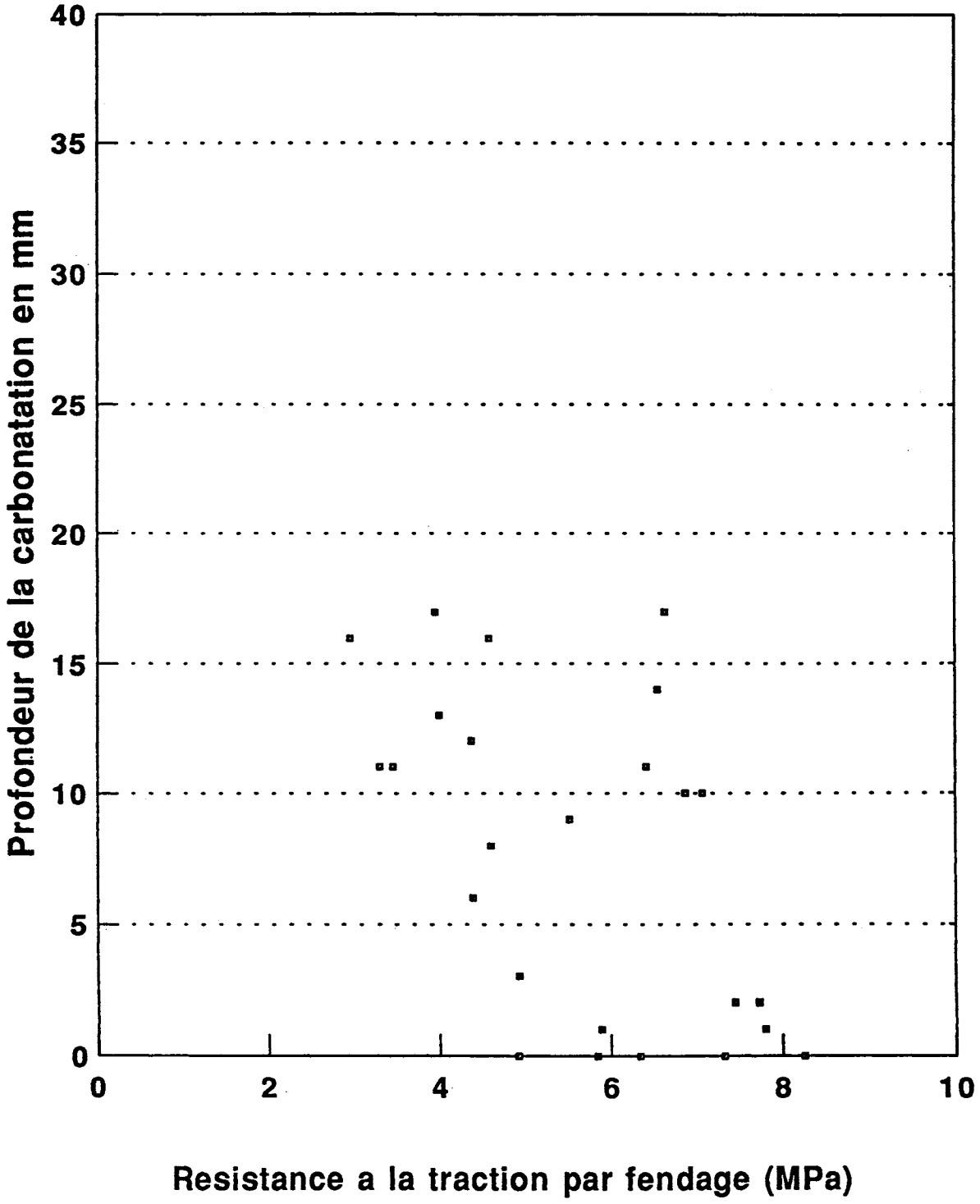


Figure 4E
Profondeur de la carbonatation par rapport a la resistance a la traction par fendage - Victoria



ANNEXE G

Figure 5A
Profondeur de la carbonatation par rapport a l'age du batiment - Halifax

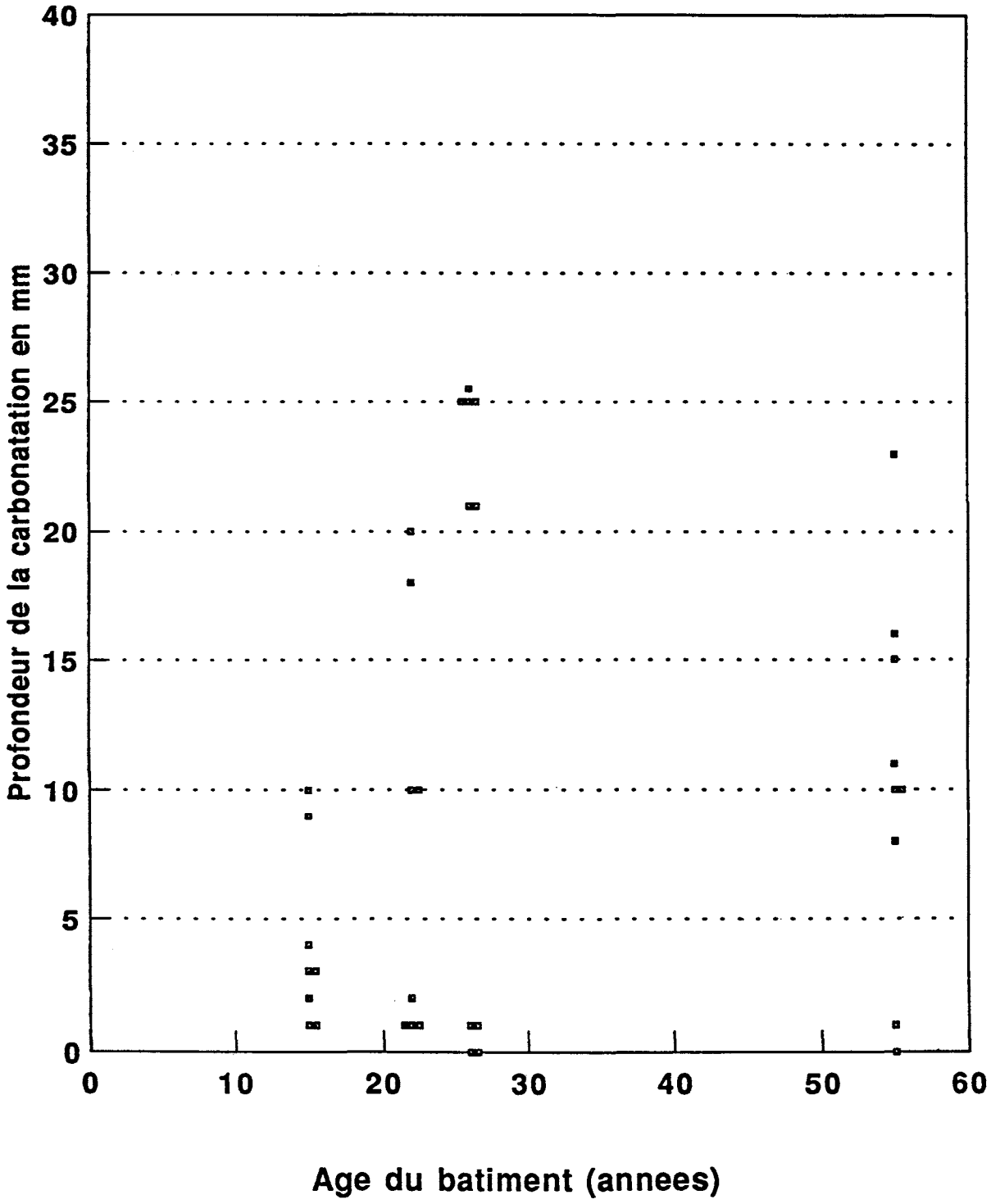


Figure 5B
Profondeur de la carbonatation par rapport a l'age du batiment - Calgary

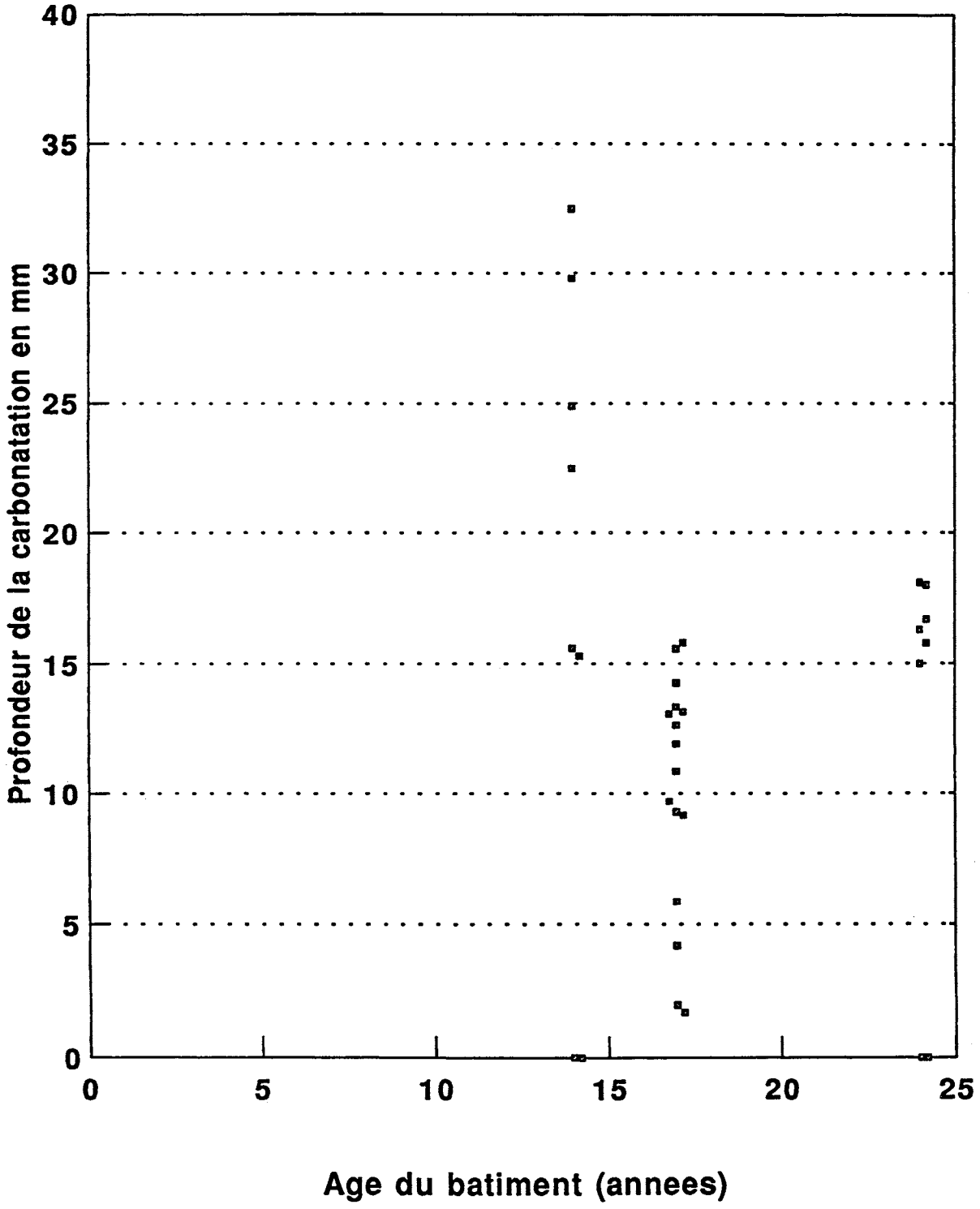


Figure 5C
Profondeur de la carbonatation par rapport a l'age du batiment - Edmonton

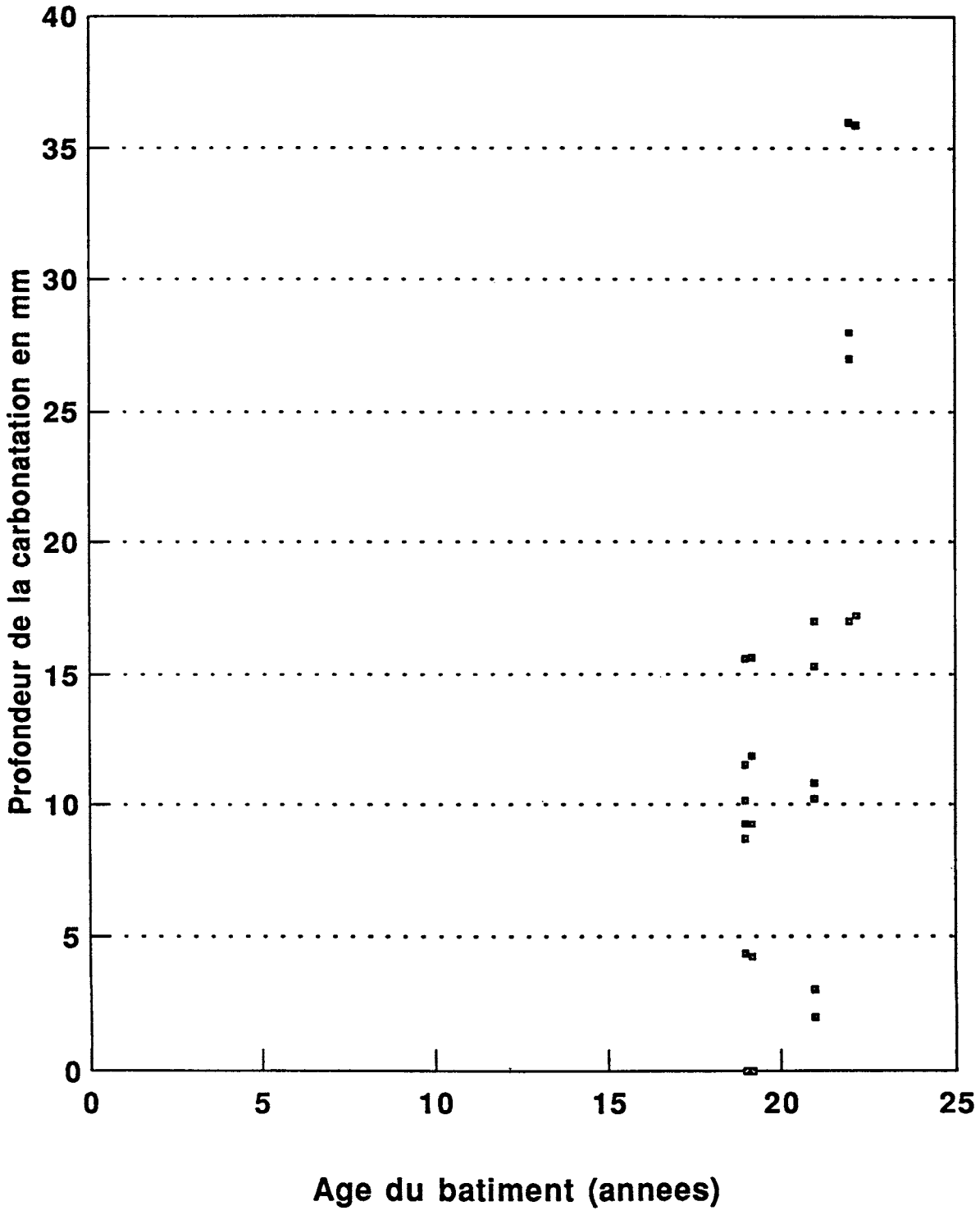


Figure 5D
Profondeur de la carbonatation par rapport a l'age du batiment - Vancouver

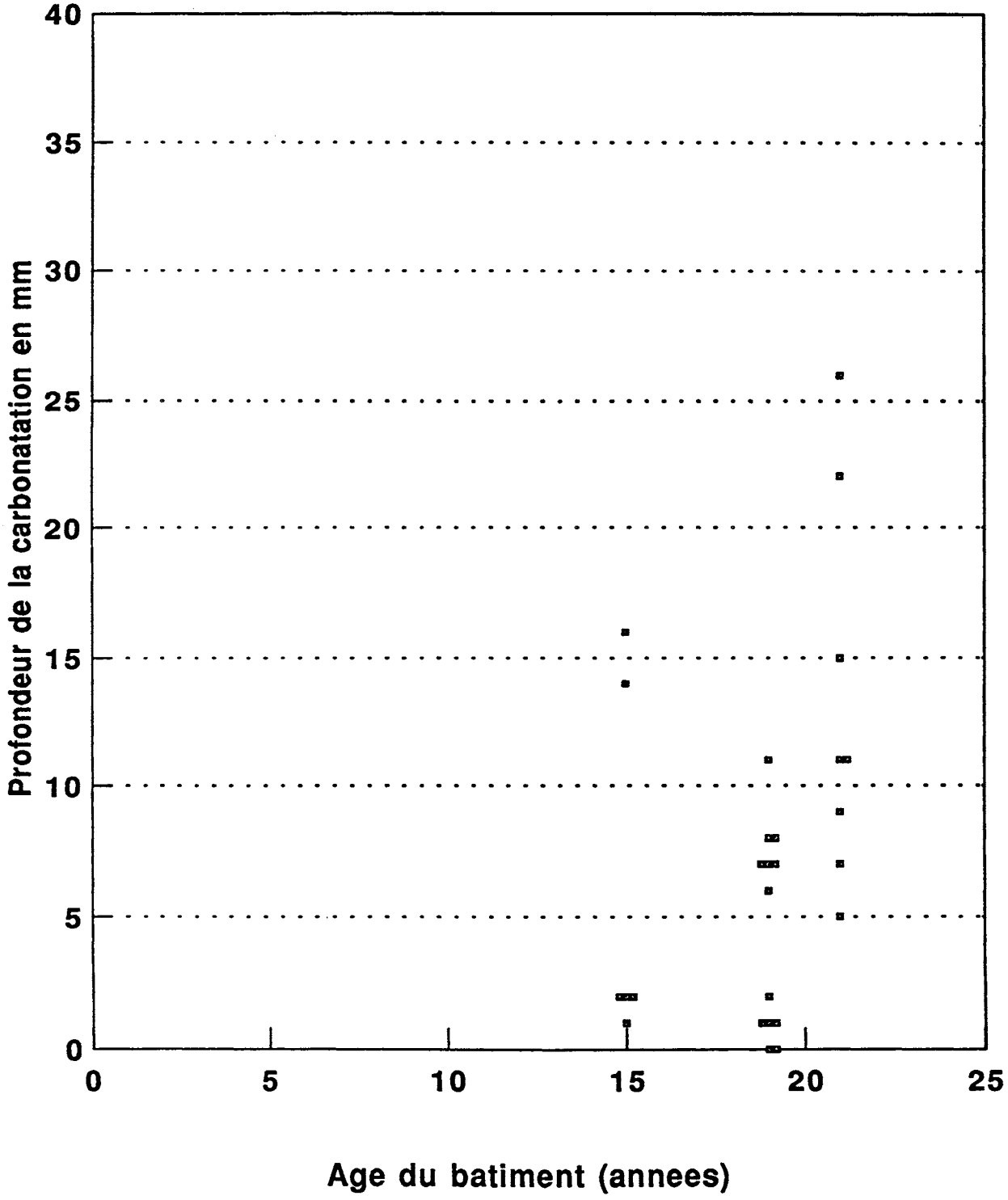
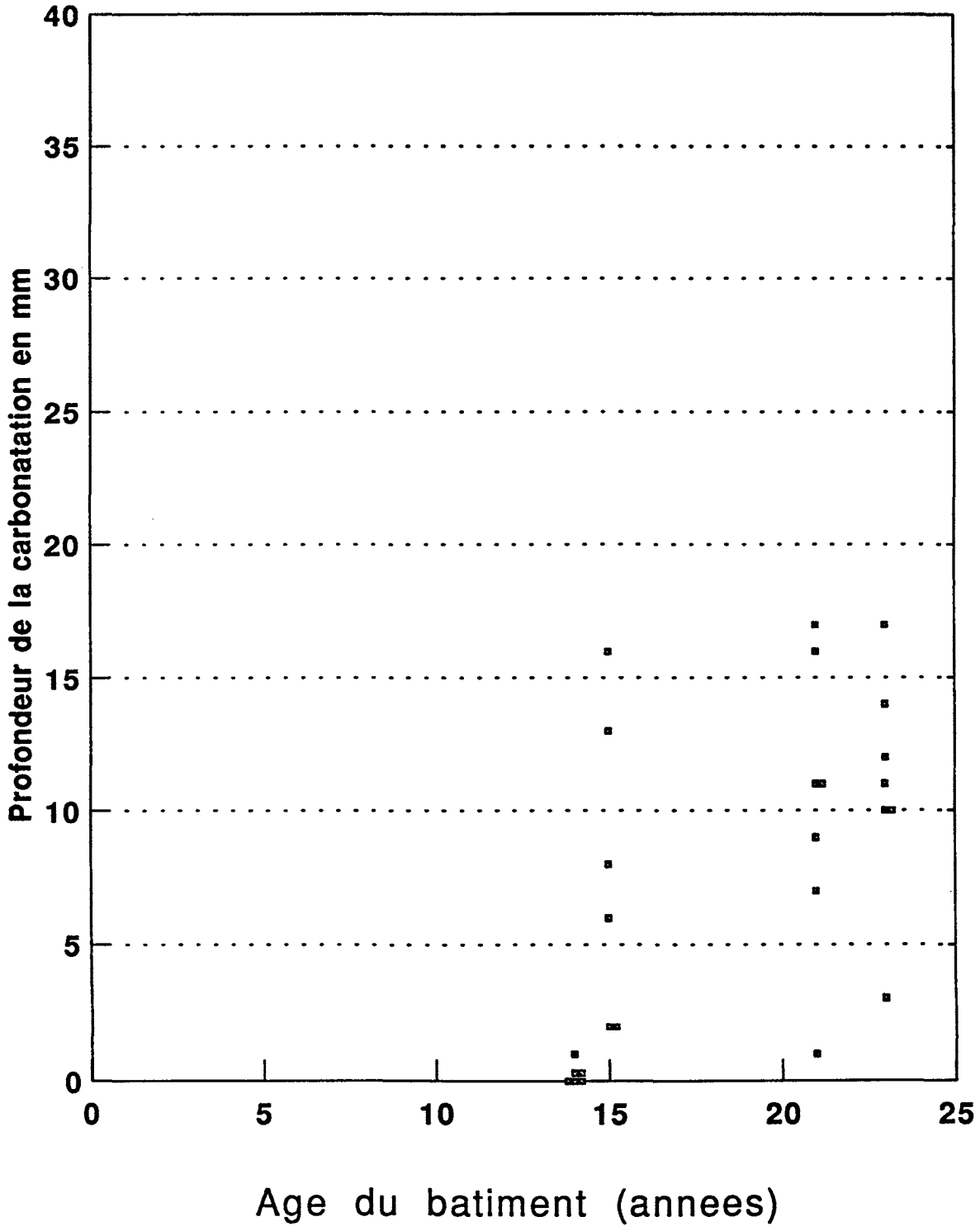


Figure 5E
Profondeur de la carbonatation par rapport a l'age du batiment - Victoria



ANNEXE H

Institute for Research in Construction

Institut de recherche en construction

CLIENT REPORT

for

Robert Halsall and Associates Limited
188 Eglinton Avenue, East, 6th Floor
Toronto, Ontario M4P 2X7

Determination of the Lime and Carbonate Content of Concrete Core Specimens

Author(s) G.G. Litvan H. Schultz

Approved J.J. Beaudoin
Section Head

Report No. CR-6353.1
Report date: 16 May, 1991
Contract No. CR-6353
Reference: Application for test dated October 24, 1990
Section: Materials

80 pages
Copy No. 1 of 6 copies

This report may not be reproduced in whole or in part without the written consent of both the client and the National Research Council Canada.

Canada

Determination of the Lime and Carbonate Content of Concrete Core Specimens

Introduction

The lime and carbonate content of concrete core specimens received from R. Halsall Associates were determined by thermogravimetric analysis.

Specimens

The cores received were registered in our laboratory as follows:

IRC Code Number	Original Code Number
D190	CO2a
D191	CO3b
D192	CS3b
D193	F/b
D194	HT/a
D195	N1a
D196	RT2a
D197	S1a
D198	C/E/Bs-1
D199	C/E/C-2s No test required
D200	C/E/C-1s
D201	C/F/EW-4
D202	C/P/s-4
D203	E/CH/C-1e
D204	E/V/W-1s
D205	E/V/W-2e
D206	E/VA/s3
D207	6653 A-1-1
D208	6653 A-2-2
D209	6653 C-2-7
D210	6653 D-1-1

Specimen Preparation

The cores were received in wet condition sealed in plastic bags. Care was taken to maintain the wet condition during cutting and storage. With a water cooled diamond saw 4 mm thick slices were cut off from the samples at horizons requested in the letters of transmittal. Before testing, the specimens were dried at 105°C for an hour, and crushed using a hammer, and a mortar and pestle. Efforts were made to remove all coarse aggregate fragments. The specimens were then stored in nitrogen atmosphere.

Thermogravimetry

Specimens, 100 mg in weight, were heated in DuPont Model 9900 instrument at 20°C/min in a stream of nitrogen gas (30 mL/min).

Results

The results of the thermogravimetric analysis are shown in graphical form (File CO2.01 through CO2.73). The absolute weight loss percent (ordinate on the left hand side) as a function of temperature and, the first derivative of the weight percent lost (ordinate on the right hand side) as a function of temperature are given.

The peak of the derivative that occurs between 450 and 550°C is due to decomposition of lime $Ca(OH)_2$ in hydrated tricalcium silicate. The peak at approximately 780°C indicates the decomposition of $CaCO_3$.

The areas below the peaks were integrated and the obtained values are directly proportional to the $Ca(OH)_2$ and $CaCO_3$ concentrations in the specimens.

The results are presented also in tabular form (Table 1).

On sample D201 the outer surface was not indicated, when received, and the outer surface was assumed to be the one with the high $CaCO_3$ content. Sample D201 at 10 mm horizon was rerun to ascertain the correctness of the assumption.

The outer surface on Core D203 appears to have been incorrectly marked, because according to the marking the high carbonate content occurred at 70 mm horizon. The horizon values indicated in Table 1 were given by assuming the other core surface to be the outer one. In this case an extra slice was cut to verify the correctness of the designation.

Comments

Because there is no method available to completely remove from the concrete all the coarse aggregate which may contain $CaCO_3$, the values given in Table 1 comprise carbonate not only resulting from carbonation of lime but possibly also carbonate of the small aggregate fragments.

The extent of carbonation can be estimated from the weight losses at around 450°C. As a first approximation one may assume that the peaks obtained by testing samples at the 65 mm horizon represent the lime content of, or close to, that originally present in the hydrated cement. Accepting the lime content of the 65 mm horizon specimens as reference, the decrease at other horizons is a measure of the extent of carbonation.

Table 1
Values obtained from testing concrete cores for extent of carbonation

Sample	Horizon, mm	Lime. %	Carbonate, %	H2O from lime	CO2 from carbonate	Ignited wt. at 1000 deg.	File No.
D190	0 mm	0.6	7.8	0.14	3.44	90.6	CO2.01
	8 mm	1.7	2.2	0.41	0.95	90.1	CO2.02
	65 mm	2.1	0.3	0.52	0.15	91.3	CO2.03
D191	10 mm	0.2	13.1	0.04	5.76	89.4	CO2.04
	23 mm	2.3	0.5	0.56	0.2	92	CO2.05
	23 mm	1.9	0.3	0.47	0.15	92.3	CO2.08
	35 mm	1.7	0.5	0.41	0.22	92.8	CO2.06
	65 mm	1.9	0.4	0.45	0.17	91.8	CO2.07
D192	10 mm	0.0	20.6	0	9.08	86.3	CO2.09
	23 mm	3.4	0.8	0.83	0.36	92.2	CO2.10
	35 mm	3.3	0.5	0.8	0.2	91.9	CO2.11
	65 mm	3.5	0.2	0.86	0.09	91.7	CO2.12
D193	0 mm	1.6	6.3	0.38	2.75	91.7	CO2.13
	8 mm	2.3	1.0	0.57	0.43	93	CO2.14
	65 mm	1.6	0.5	0.38	0.22	93.5	CO2.15
D194	0 mm	2.8	4.4	0.69	1.93	92	CO2.16
	8 mm	5.0	0.2	1.21	0.1	93	CO2.17
	65 mm	5.0	0.2	1.22	0.08	91.2	CO2.18
D195	20 mm	0.0	14.4	0	6.35	87.2	CO2.19
	35 mm	0.7	0.8	0.18	0.35	93.8	CO2.20
	48 mm	0.6	1.0	0.14	0.42	93.6	CO2.21
	65 mm	0.6	0.7	0.15	0.3	92.4	CO2.22
D196	0 mm	2.4	2.4	0.58	1.07	93.3	CO2.23
	8 mm	3.9	0.4	0.95	0.18	92.6	CO2.24
	65 mm	4.2	0.0	1.02	0	93.8	CO2.25

Table 1
Values obtained from testing concrete cores for extent of carbonation

Sample	Horizon, mm	Lime. %	Carbonate, %	H2O from lime	CO2 from carbonate	Ignited wt. at 1000 deg.	File No.
D197	10 mm	0.0	16.4	0	7.2	89.6	CO2.26
	23 mm	0.6	3.3	0.14	1.44	93	CO2.27
	35 mm	1.0	0.4	0.24	0.16	93.6	CO2.28
	65 mm	1.8	0.2	0.43	0.1	93	CO2.29
D198	0 mm	2.4	26.7	0.58	11.76	81.1	CO2.30
	8 mm	3.7	24.6	0.9	10.82	80.9	CO2.31
	65 mm	5.6	20.3	1.35	8.93	80	CO2.32
D200	25 mm	0.0	28.2	0	12.41	82.9	CO2.33
	35 mm	1.0	17.3	0.24	7.63	86	CO2.34
	48 mm	2.1	13.1	0.5	5.78	85.5	CO2.35
	65 mm	3.4	10.3	0.82	4.52	88.3	CO2.36
D201	10 mm	0.0	37.2	0	16.38	77.6	CO2.40
	41 mm	4.8	14.3	1.17	6.29	85.3	CO2.39
	53 mm	5.1	15.2	1.25	6.7	84.1	CO2.38
	66 mm	5.1	17.0	1.23	7.48	82.8	CO2.37
D202	0 mm	0.0	33.3	0	14.65	76.7	CO2.41
	8 mm	0.0	31.8	0	13.97	78.5	CO2.42
	65 mm	4.4	18.5	1.07	8.13	82.1	CO2.43
D203	0 mm	0.2	15.6	0.06	6.86	88.1	CO2.46
	8 mm	4.1	6.1	0.99	2.67	88.2	C02.72
	62 mm	5.1	4.7	1.25	2.05	88.2	CO2.45
	70 mm	5.0	2.1	1..21	0.92	89.1	CO2.44
D204	30 mm	0.3	9.4	0.08	4.13	90.6	CO2.47
	39 mm	2.3	1.3	0.56	0.57	93.8	CO2.48
	48 mm	1.9	1.8	0.47	0.8	92.5	CO2.49
	65 mm	1.9	1.6	0.46	0.69	92.8	CO2.50

Table 1
Values obtained from testing concrete cores for extent of carbonation

Sample	Horizon, mm	Lime. %	Carbonate, %	H2O from lime	CO2 from carbonate	Ignited wt. at 1000 deg.	File No.
D205	23 mm	0.0	10.9	0.01	4.81	90.7	CO2.51
	35 mm	3.2	1.6	0.78	0.71	92.1	CO2.52
	48 mm	2.8	2.4	0.68	1.04	92.1	CO2.53
	65 mm	2.1	2.9	0.51	1.26	91.5	CO2.54
D206	0 mm	0.3	26.3	0.08	11.58	83	CO2.55
	8 mm	4.5	2.7	1.09	1.19	90.3	CO2.56
	65 mm	4.2	2.2	1.01	0.97	90.3	CO2.57
D207	23 mm	0.2	16.2	0.04	7.13	87.2	CO2.58
	35 mm	3.2	0.9	0.77	0.39	93.3	CO2.59
	48 mm	3.9	0.3	0.95	0.14	93	CO2.60
	65 mm	4.1	0.3	0.99	0.13	91.2	CO2.61
D208	0 mm	2.9	4.4	0.7	1.95	90.9	CO2.62
	8 mm	5.6	0.5	1.35	0.2	90.2	CO2.63
	65 mm	5.2	1.6	1.26	0.71	90.4	CO2.64
D209	15 mm	6.0	1.6	1.46	0.69	89.9	CO2.65
	23 mm	6.1	0.7	1.48	0.31	90.4	CO2.66
	35 mm	6.1	0.6	1.49	0.26	89.9	CO2.67
	65 mm	6.1	0.5	1.48	0.24	89.7	CO2.68
D210	0 mm	1.1	15.8	0.27	6.97	87.5	CO2.69
	8 mm	4.9	2.4	1.19	1.04	89.4	CO2.70
	65 mm	4.7	1.0	1.15	0.45	89.7	CO2.71

ANNEXE J

Figure 6A
Resultats comparatifs de essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Halifax (carotte 6653A1-1)

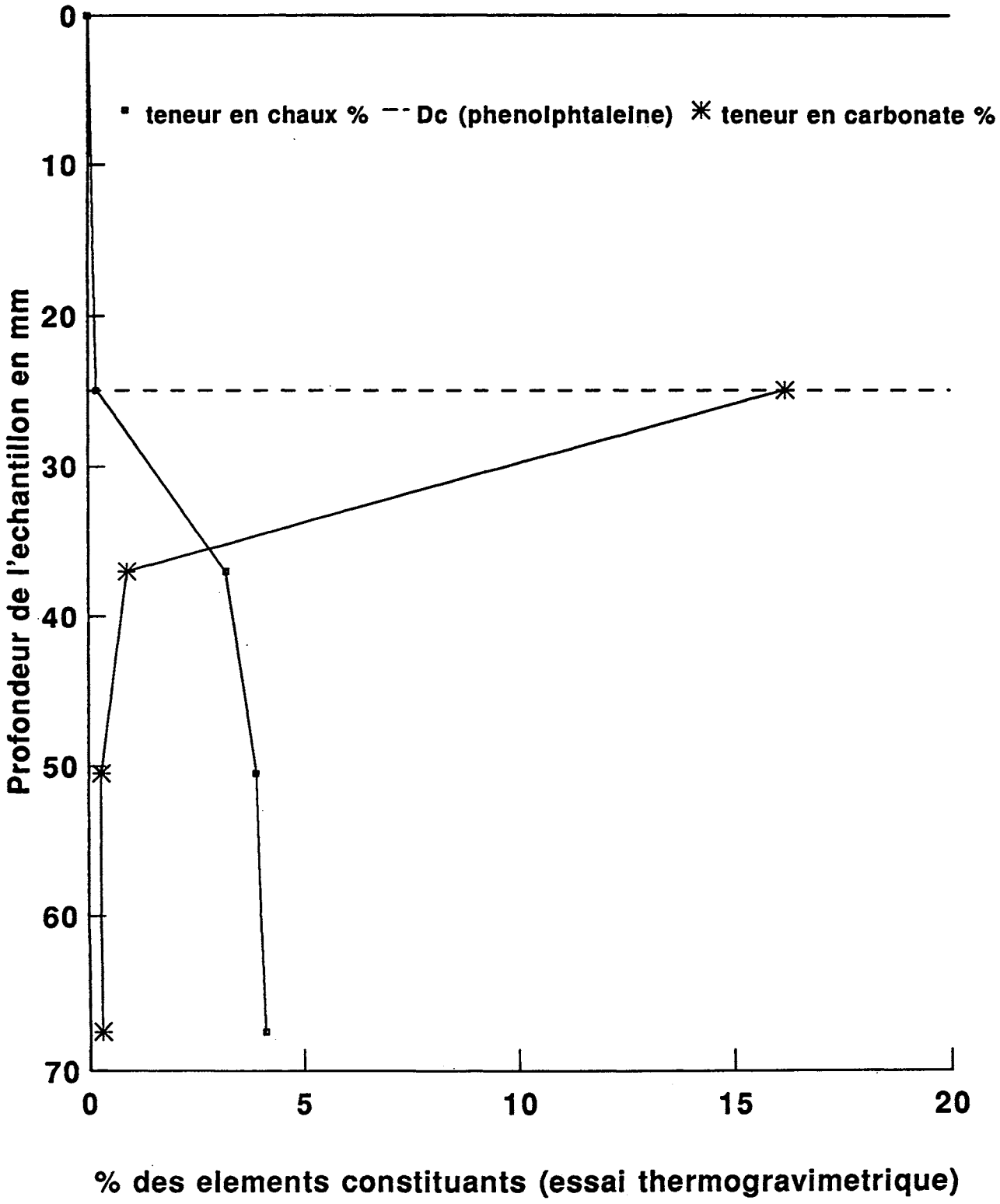


Figure 6B
Resultats comparatifs de essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Halifax (carotte 6653A2-2)

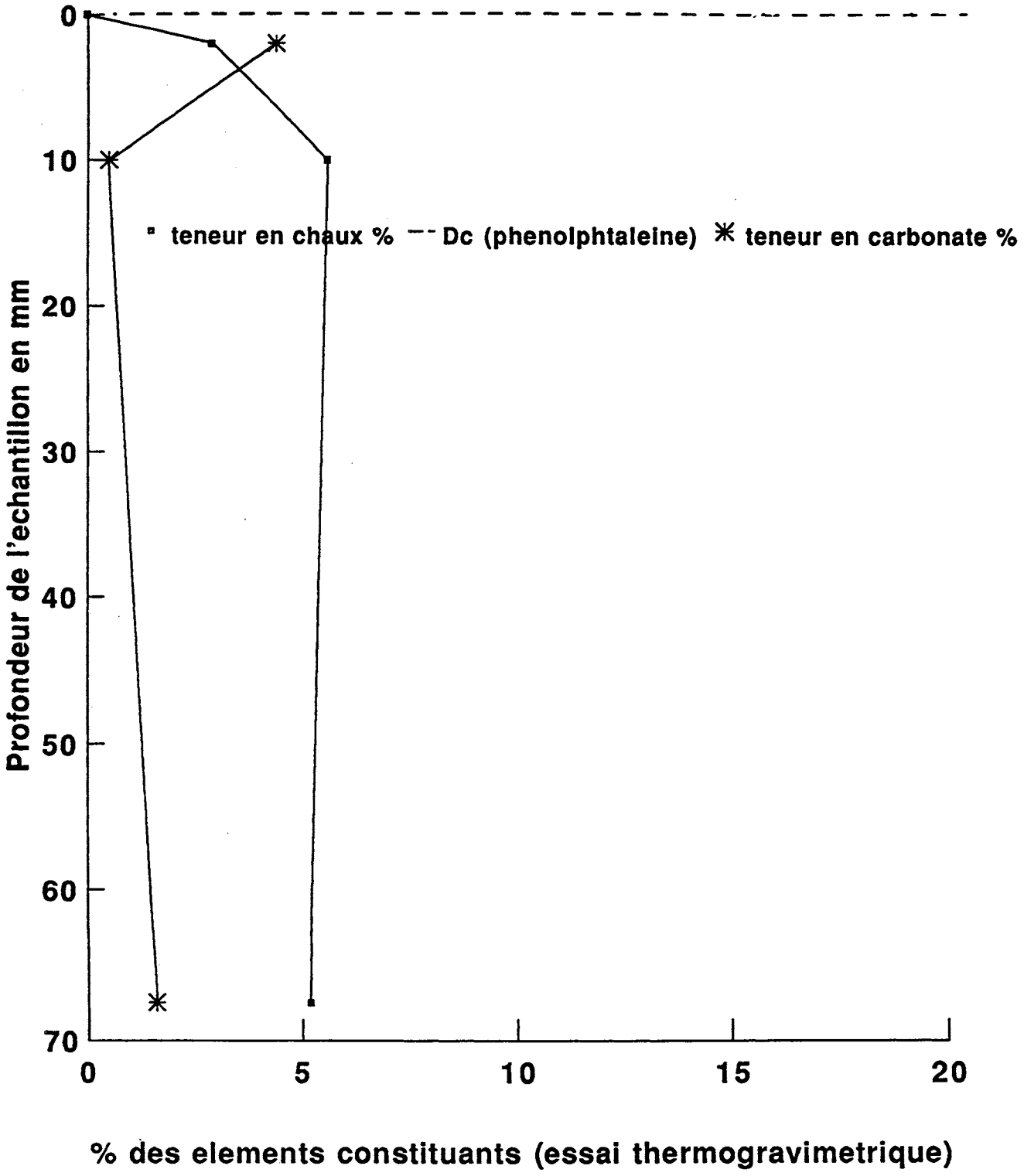


Figure 6C
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Halifax (carotte 6653C2-7)

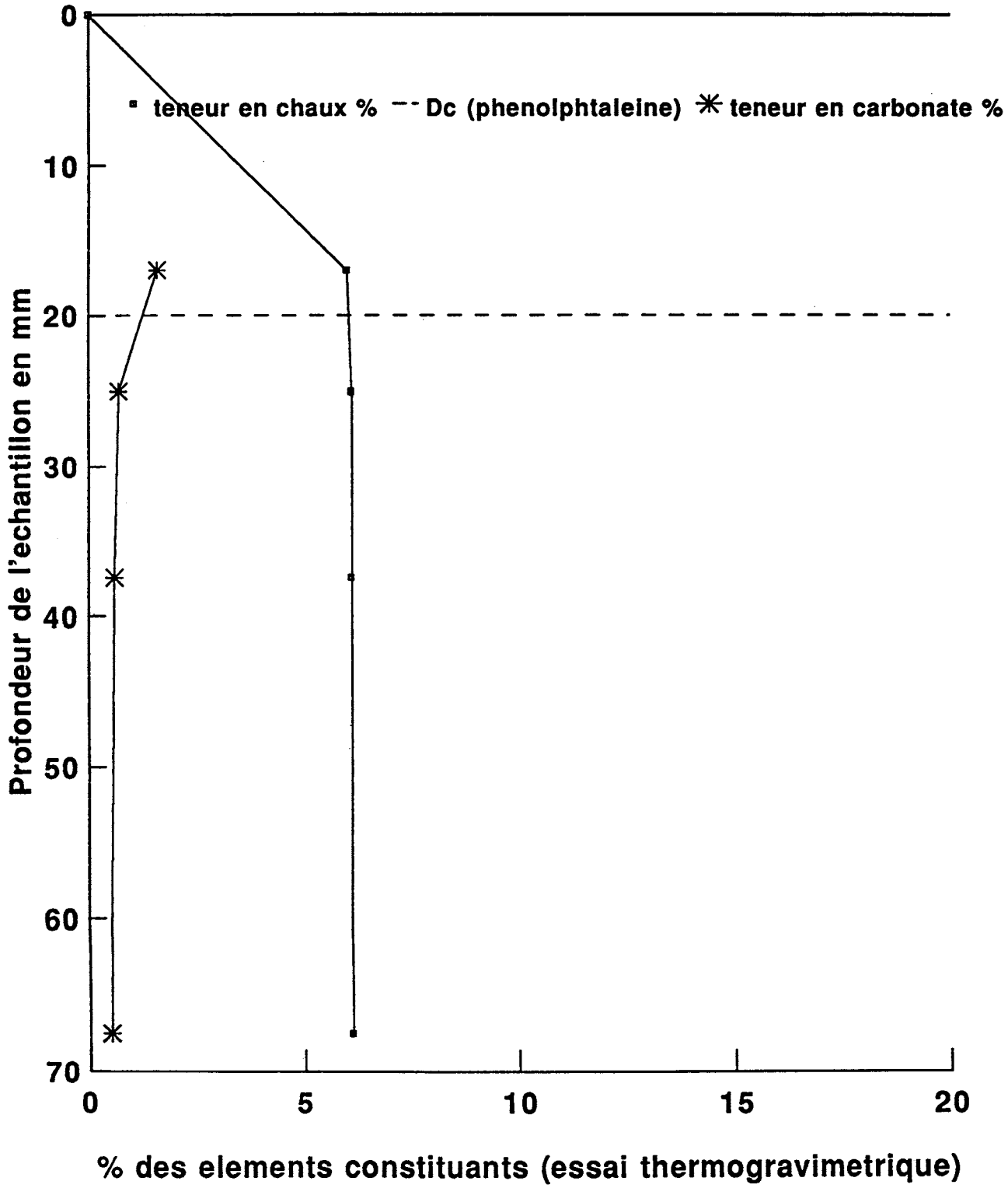


Figure 6D
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques- Halifax (carotte 6653D1-1)

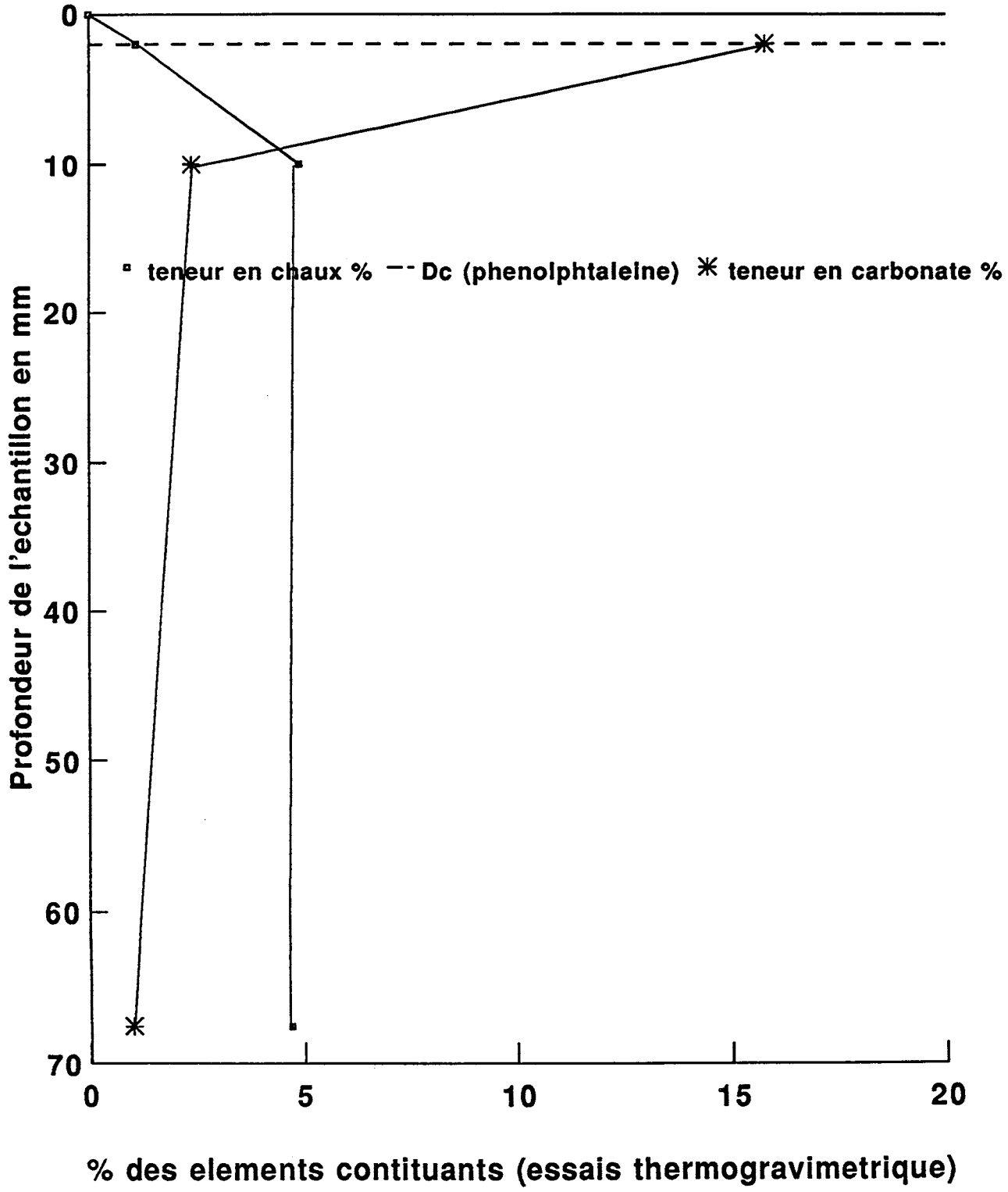


Figure 6E
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Calgary (carotte C/E/BS-1)

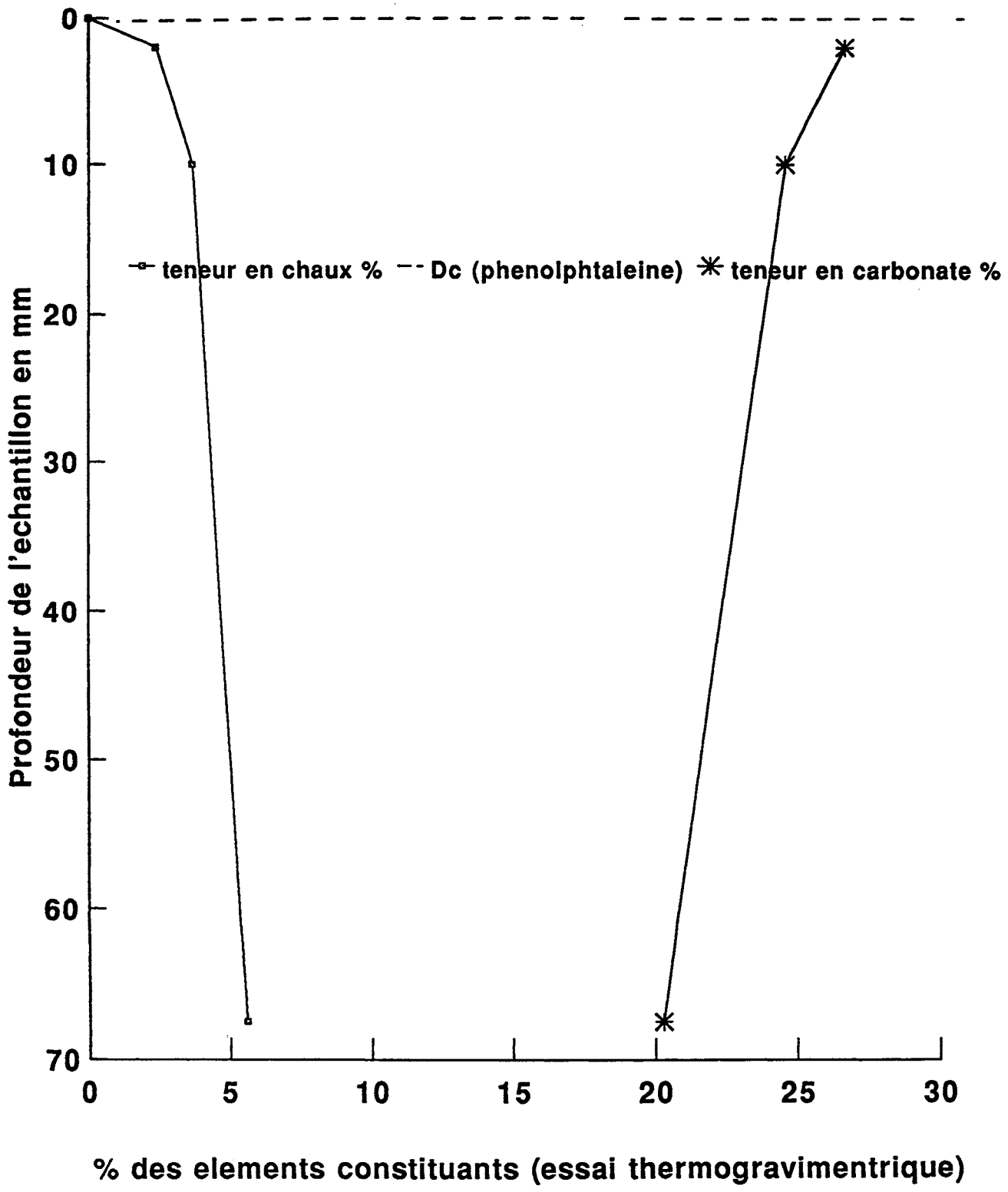


Figure 6F
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Calgary (carotte C/E/C-1s)

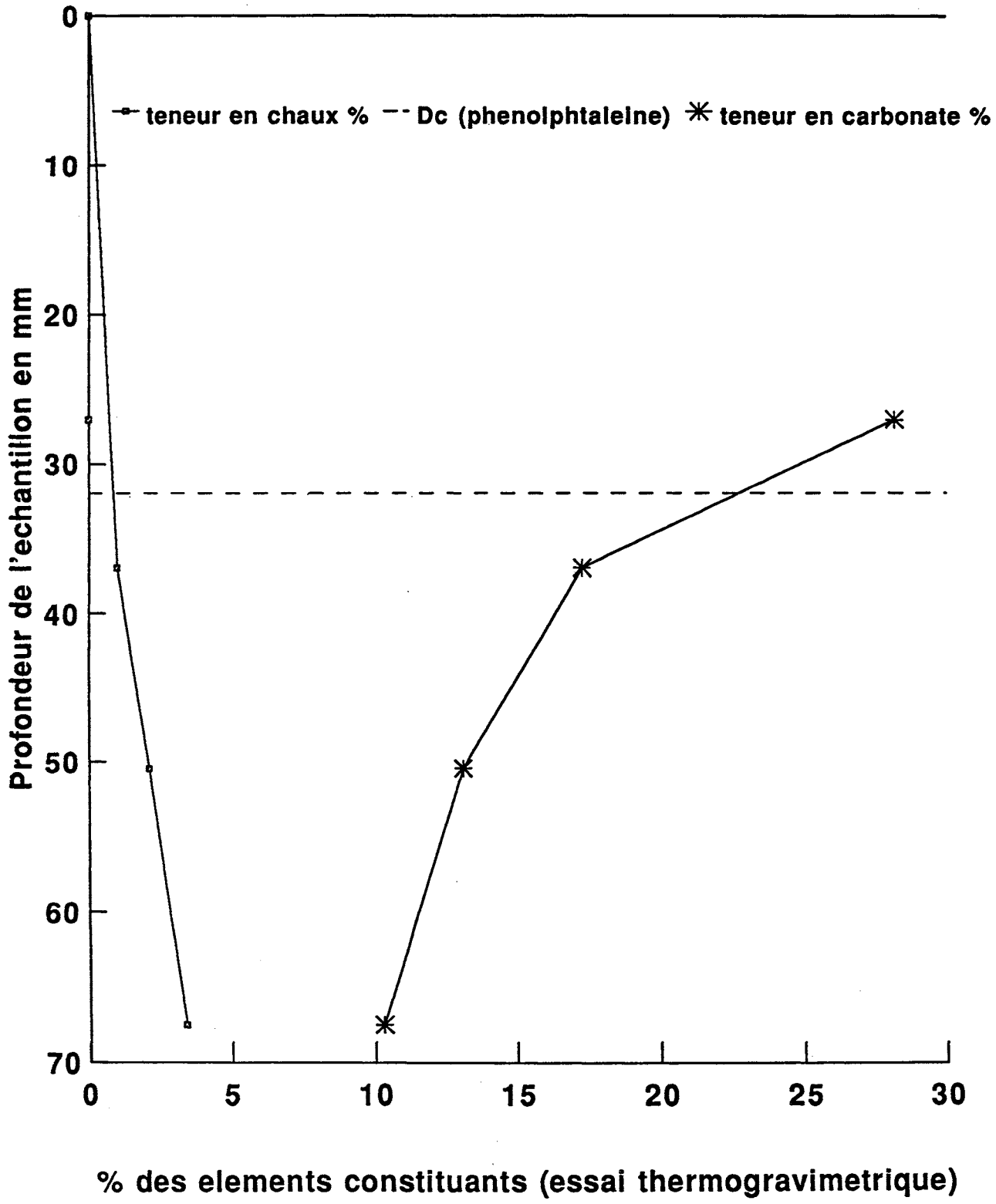


Figure 6G
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Calgary (carotte C/F/EW-4)

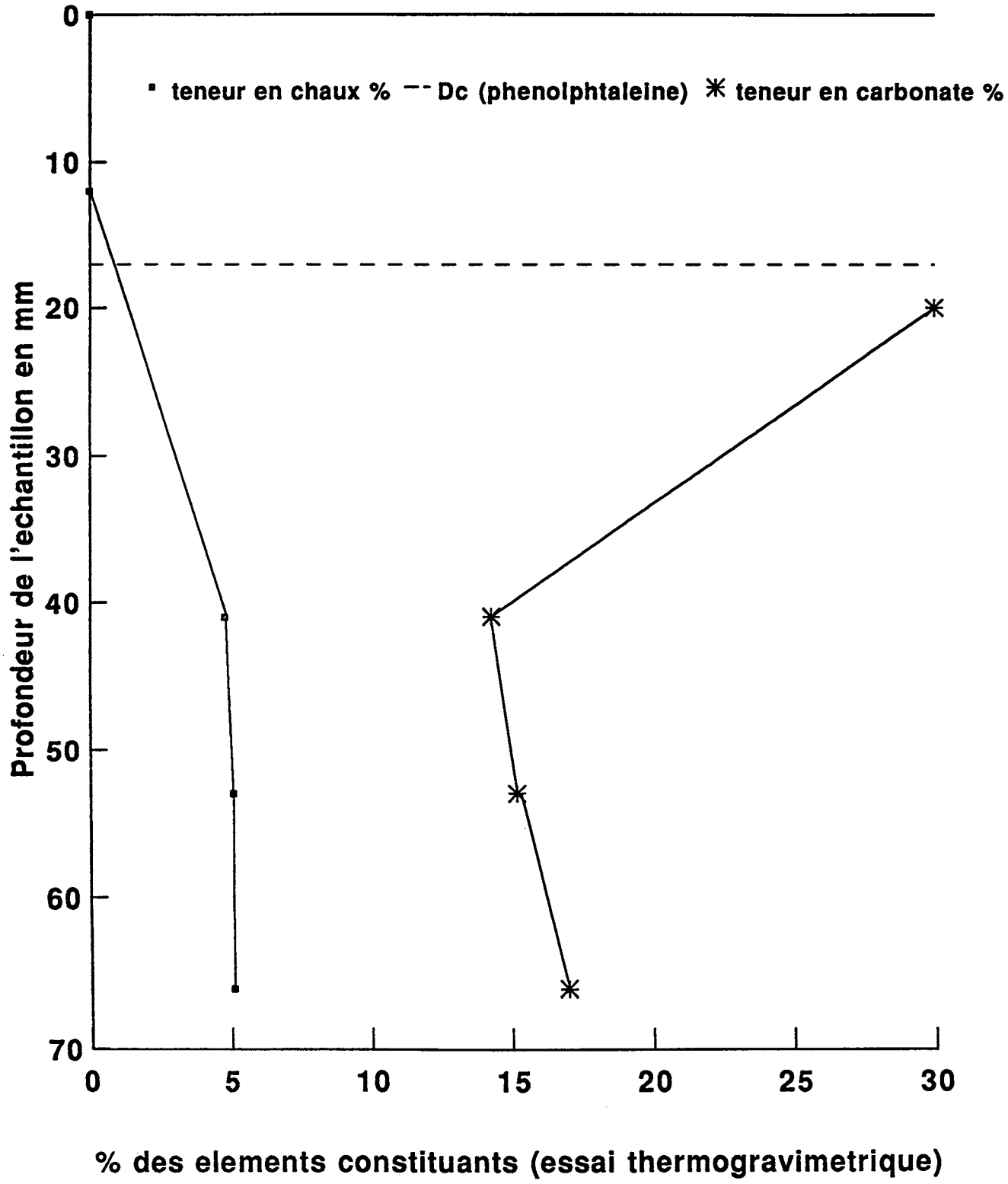


Figure 6H
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Calgary (carotte C/P/S-4)

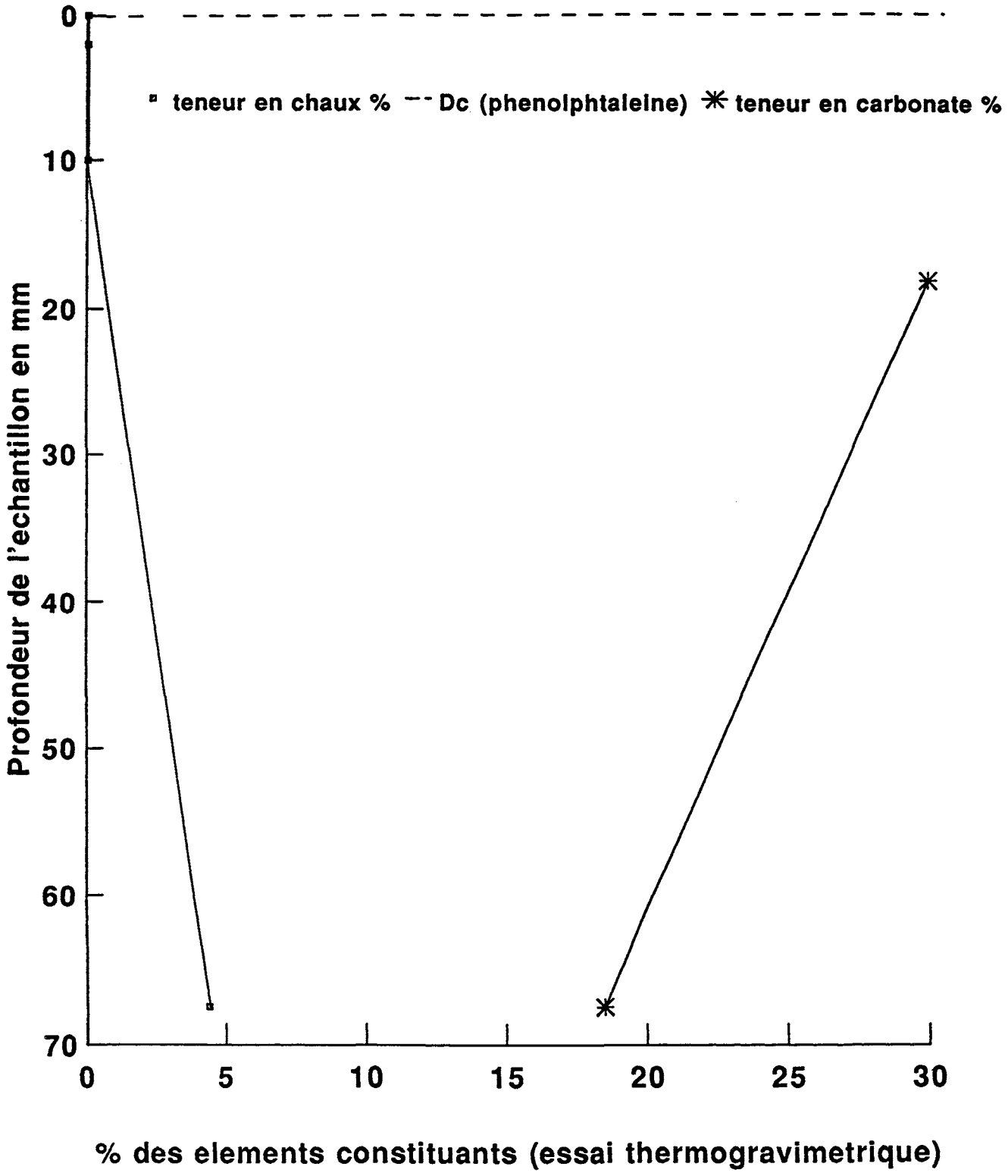


Figure 6J
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Edmonton (carotte E/CH/C-1E)

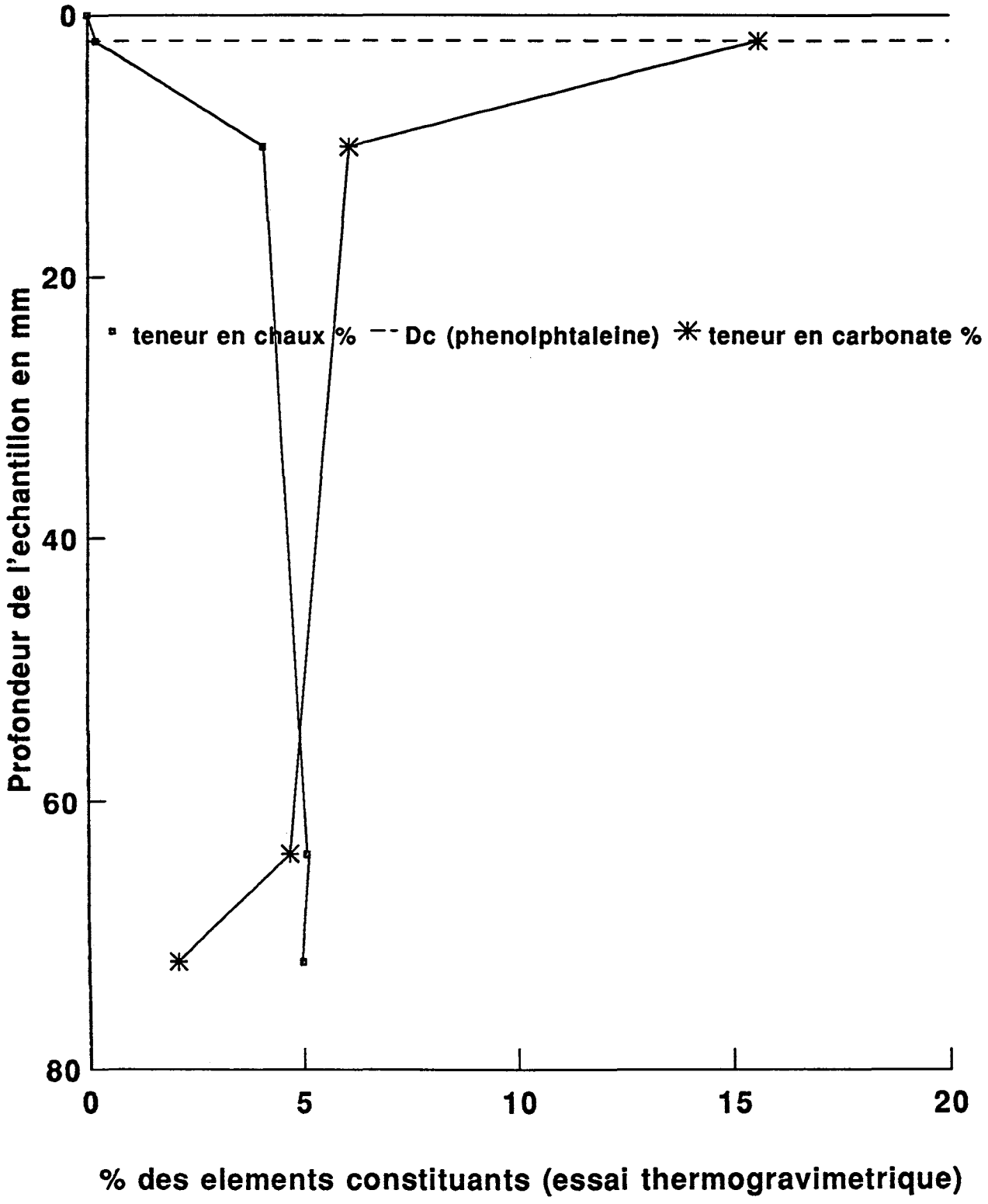


Figure 6K
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Edmonton (carotte E/V/W-1S)

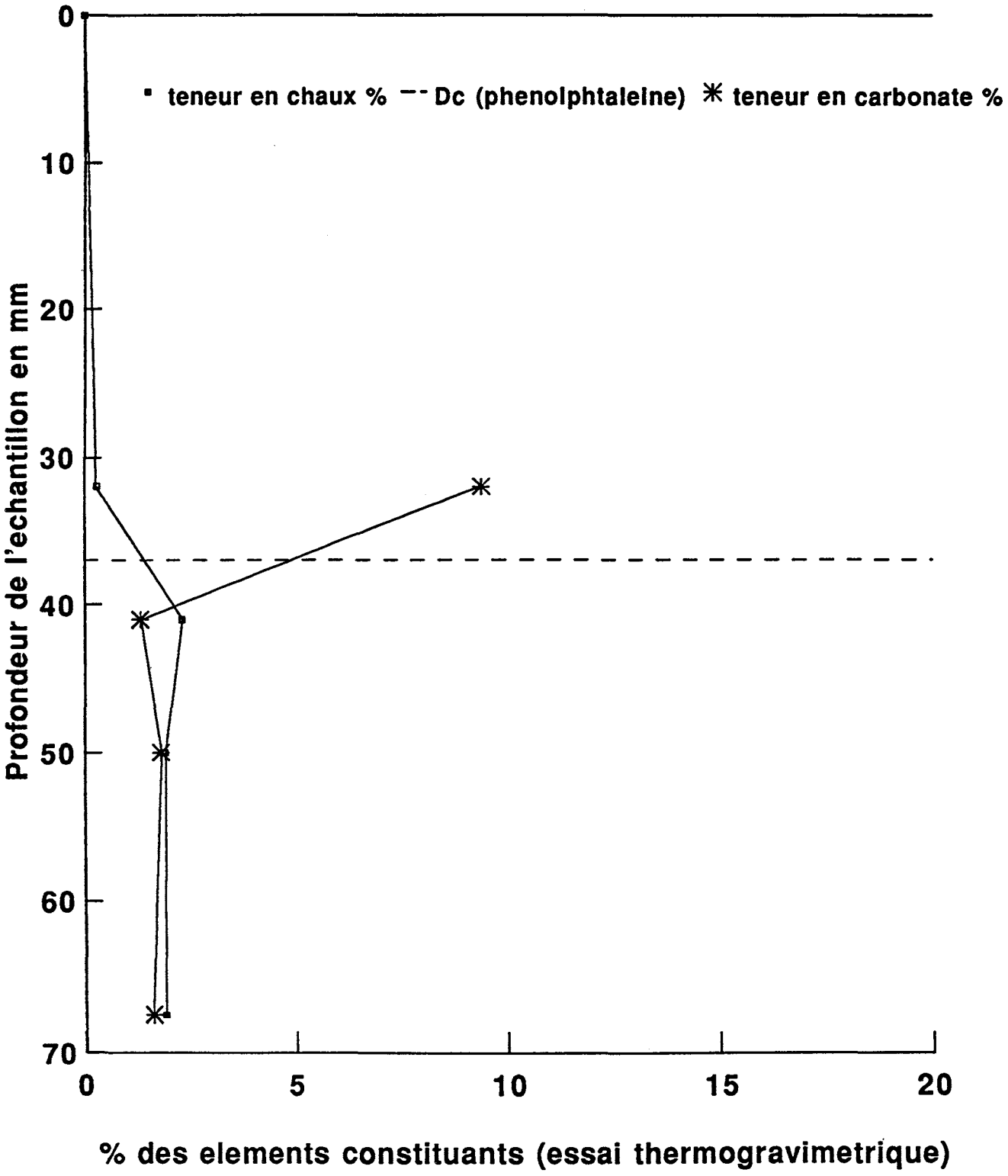


Figure 6L
Resultats comparatifs des essais phenolphtaleine et thermogravimetriques - Edmonton (carotte E/V/W-2E)

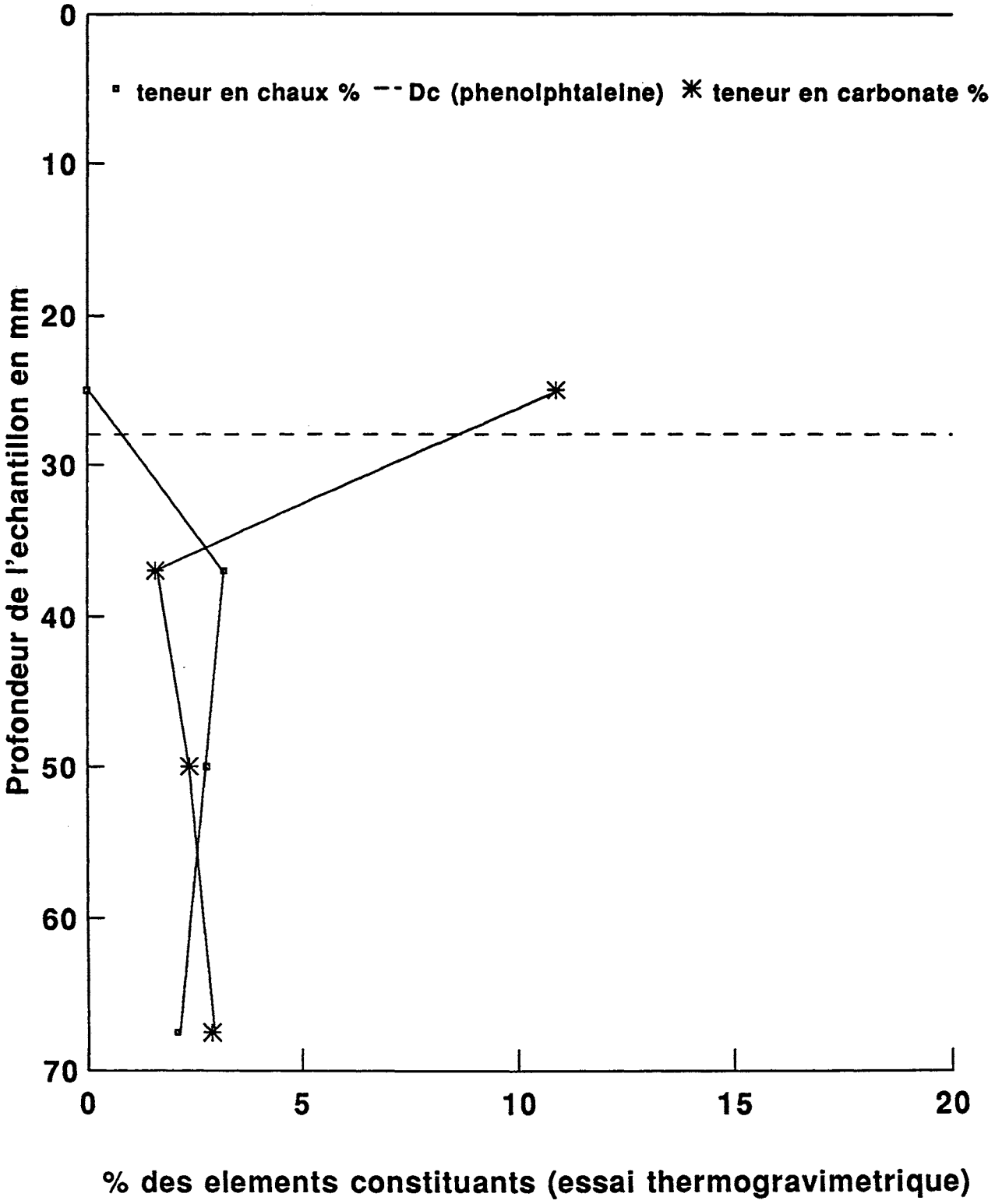


Figure 6M
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Edmonton (carotte E/VA/S3)

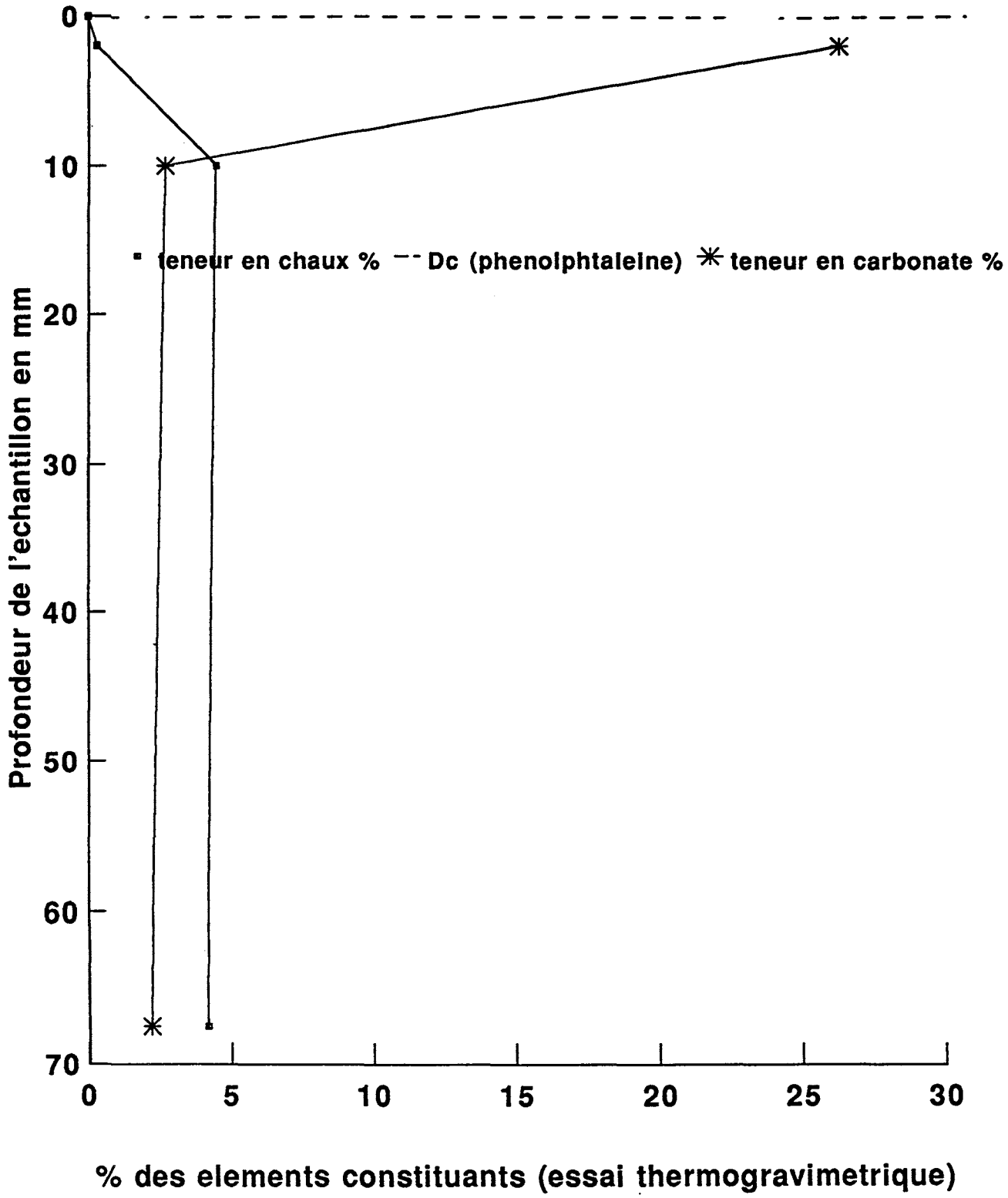


Figure 6N
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Vancouver (carotte HT1a)

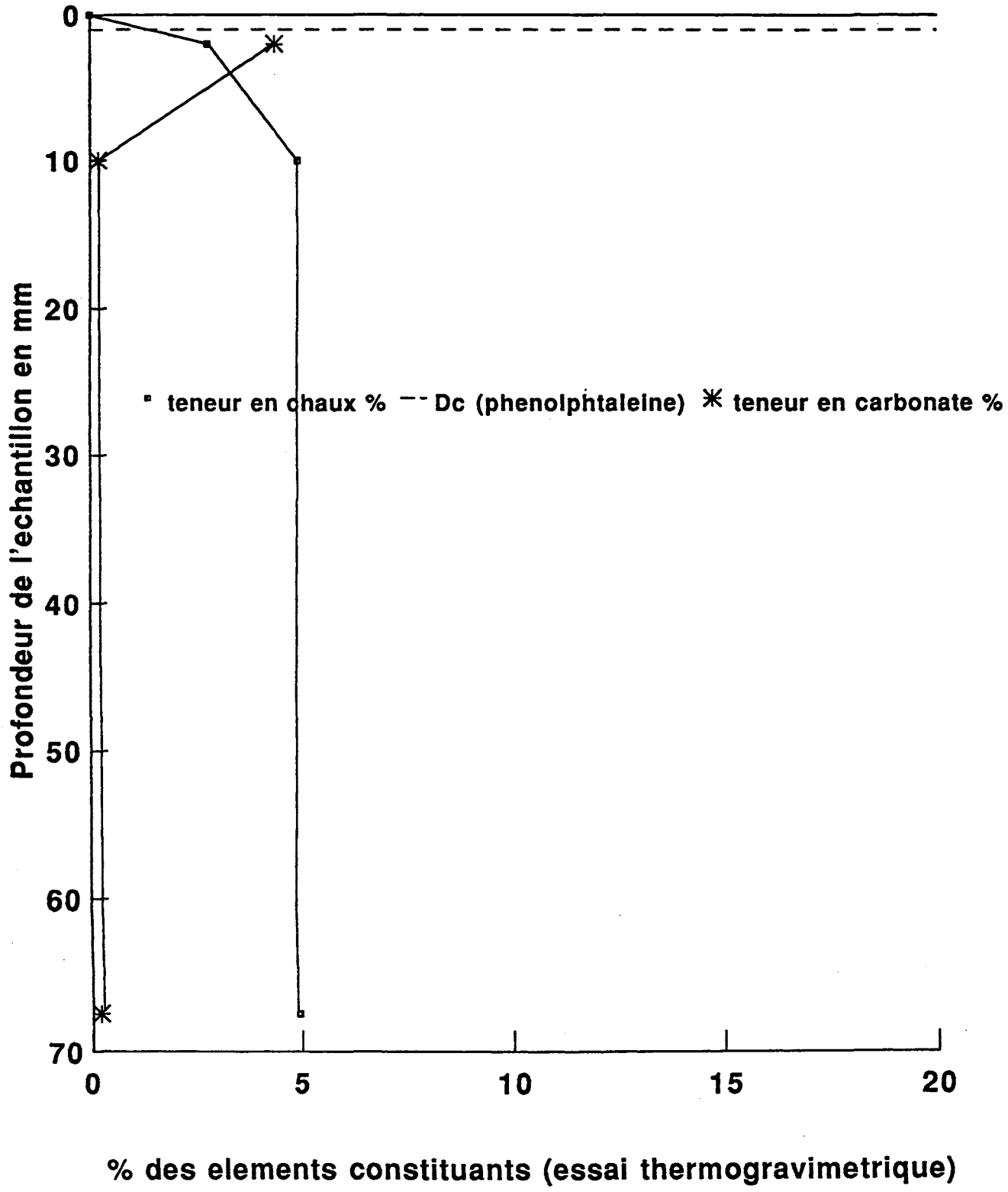


Figure 6P
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Vancouver (carotte N1a)

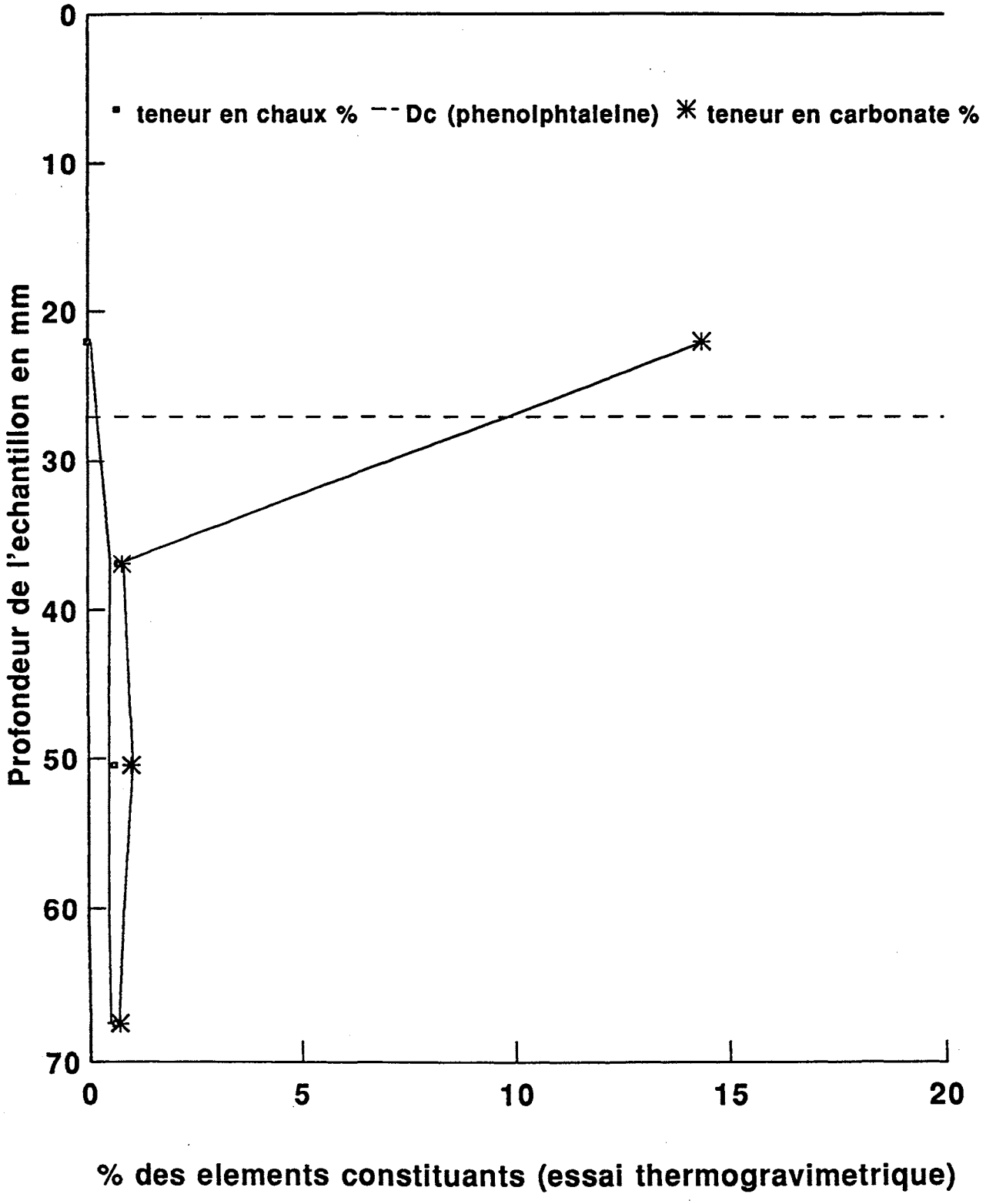


Figure 6Q
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Vancouver (carotte RT2a)

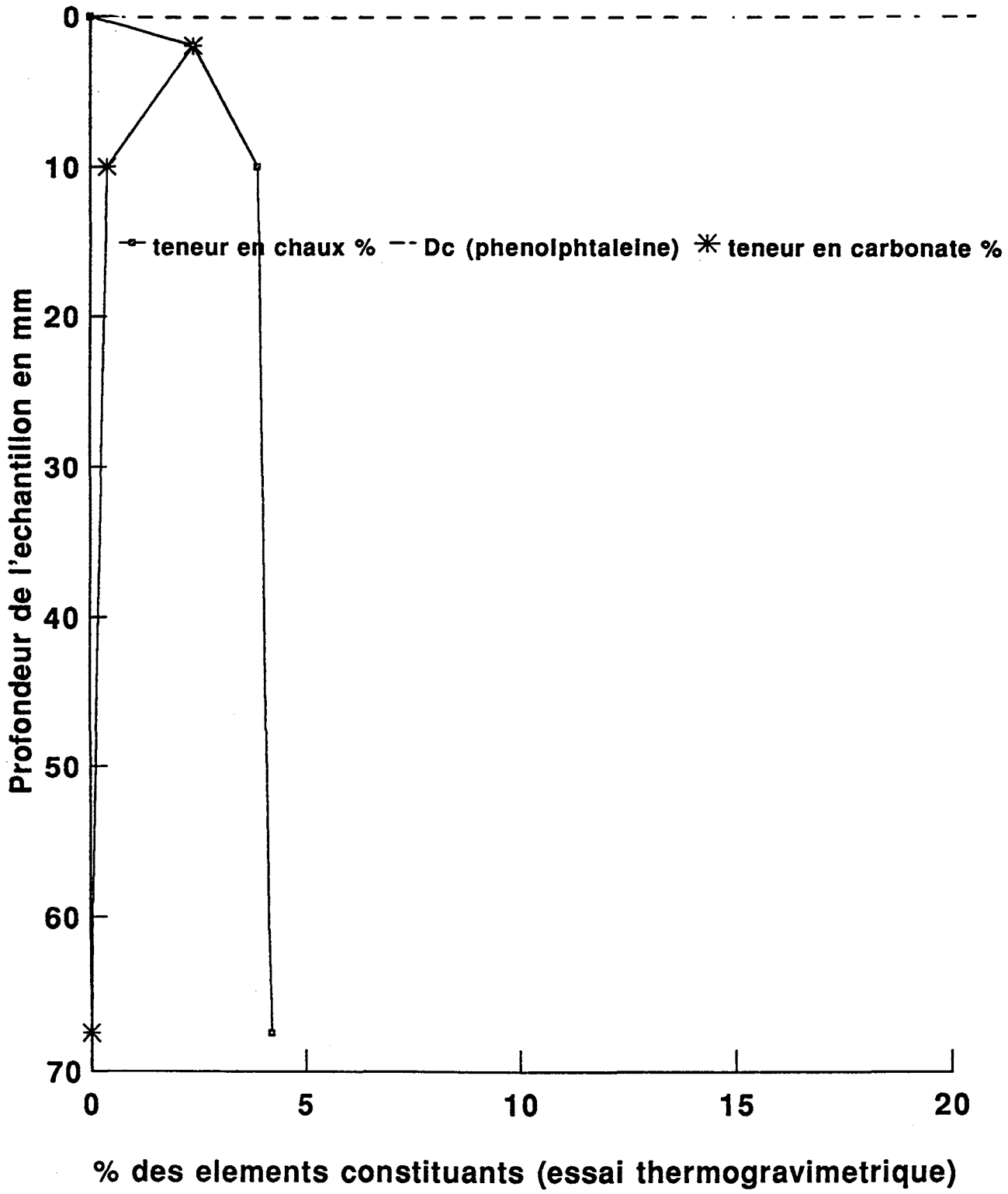


Figure 6R
Resultats comparatifs des essais phenolphtaleine et thermogravimetriques - Vancouver (carotte S1a)

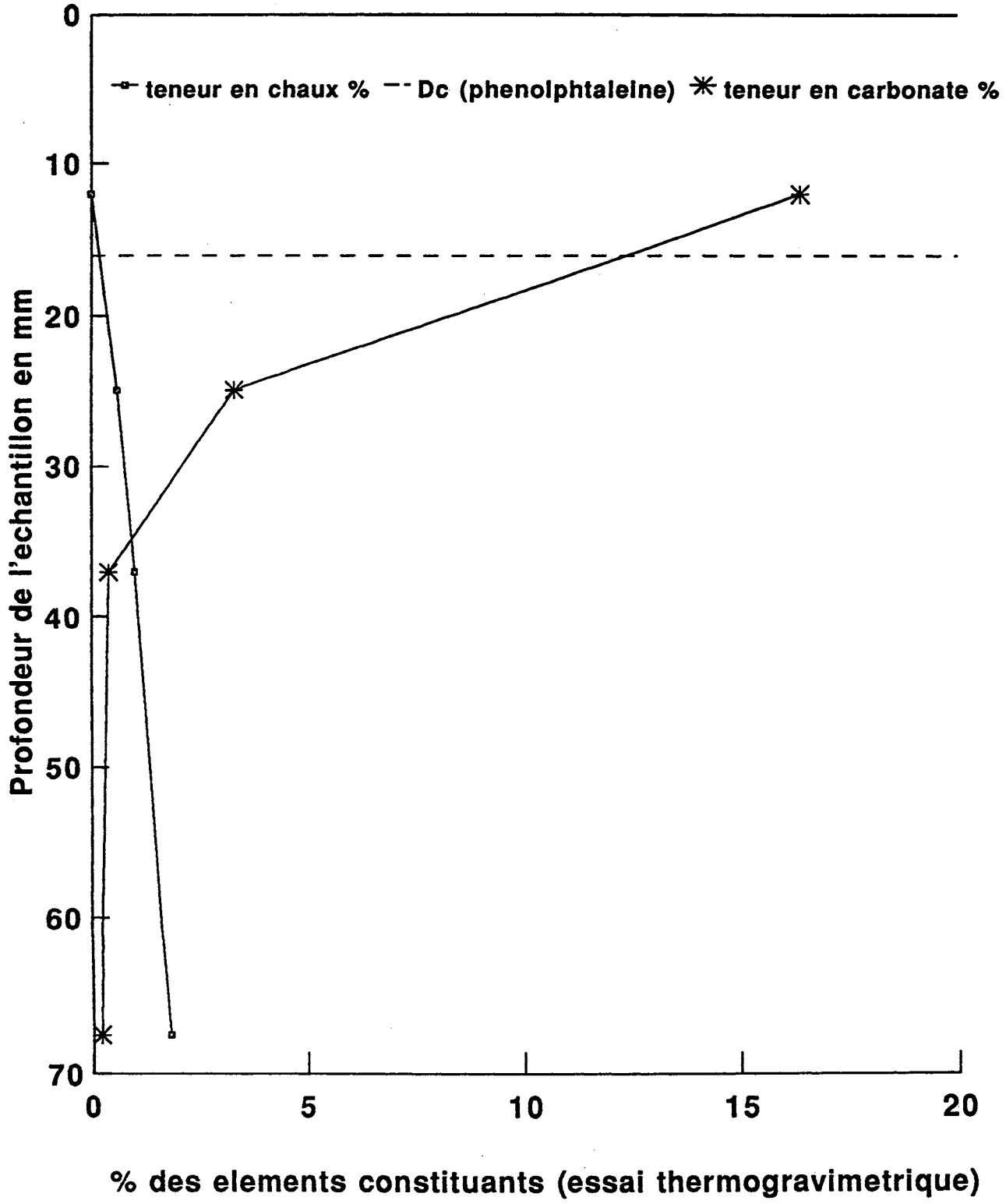


Figure 6S
Resultats comparatifs des essais phenolphtaleine et thermogravimetriques - Victoria (carotte CO2a)

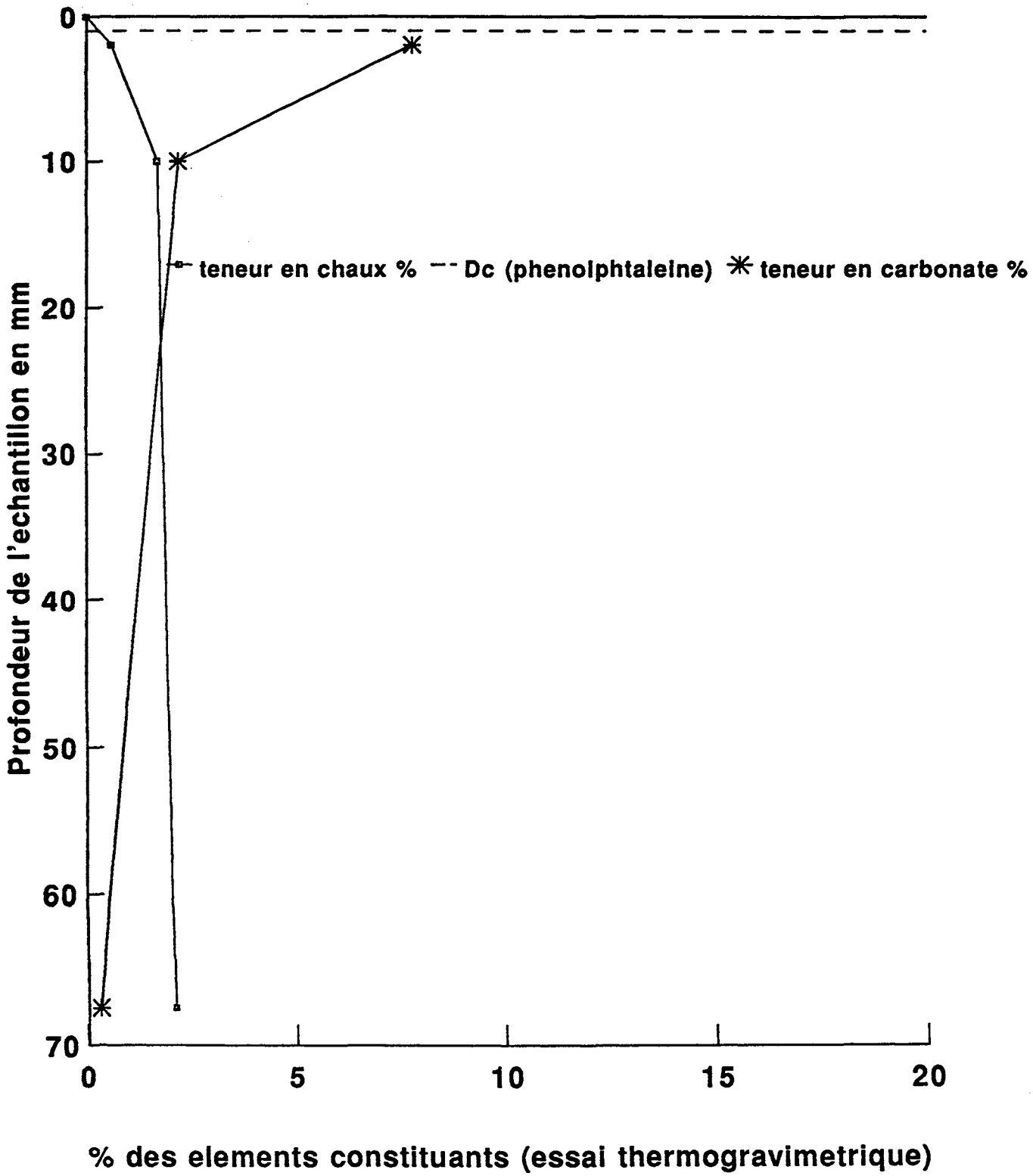


Figure 6T
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravitmetriques - Victoria (carotte CO3b)

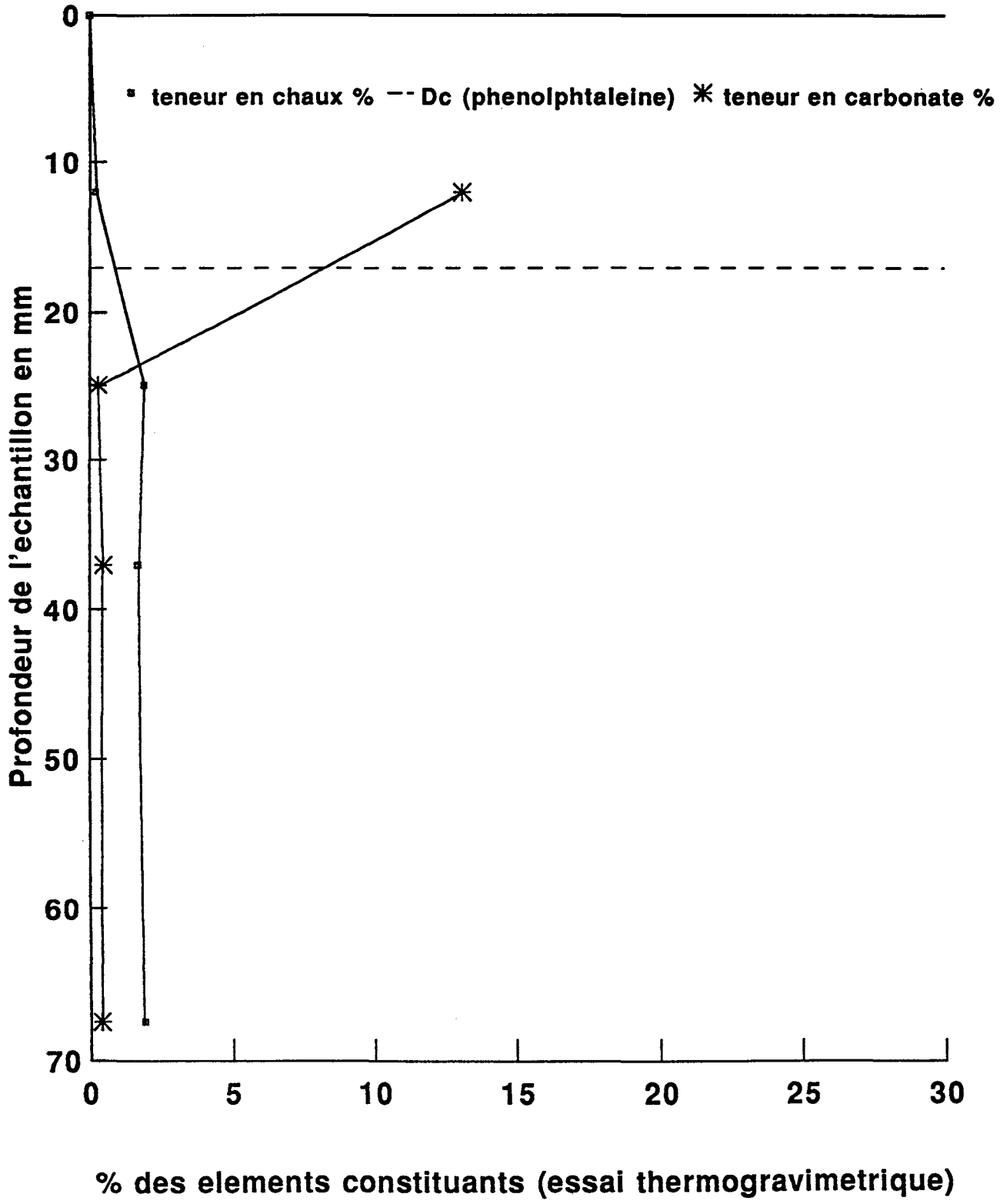


Figure 6U
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Victoria (carotte CS3b)

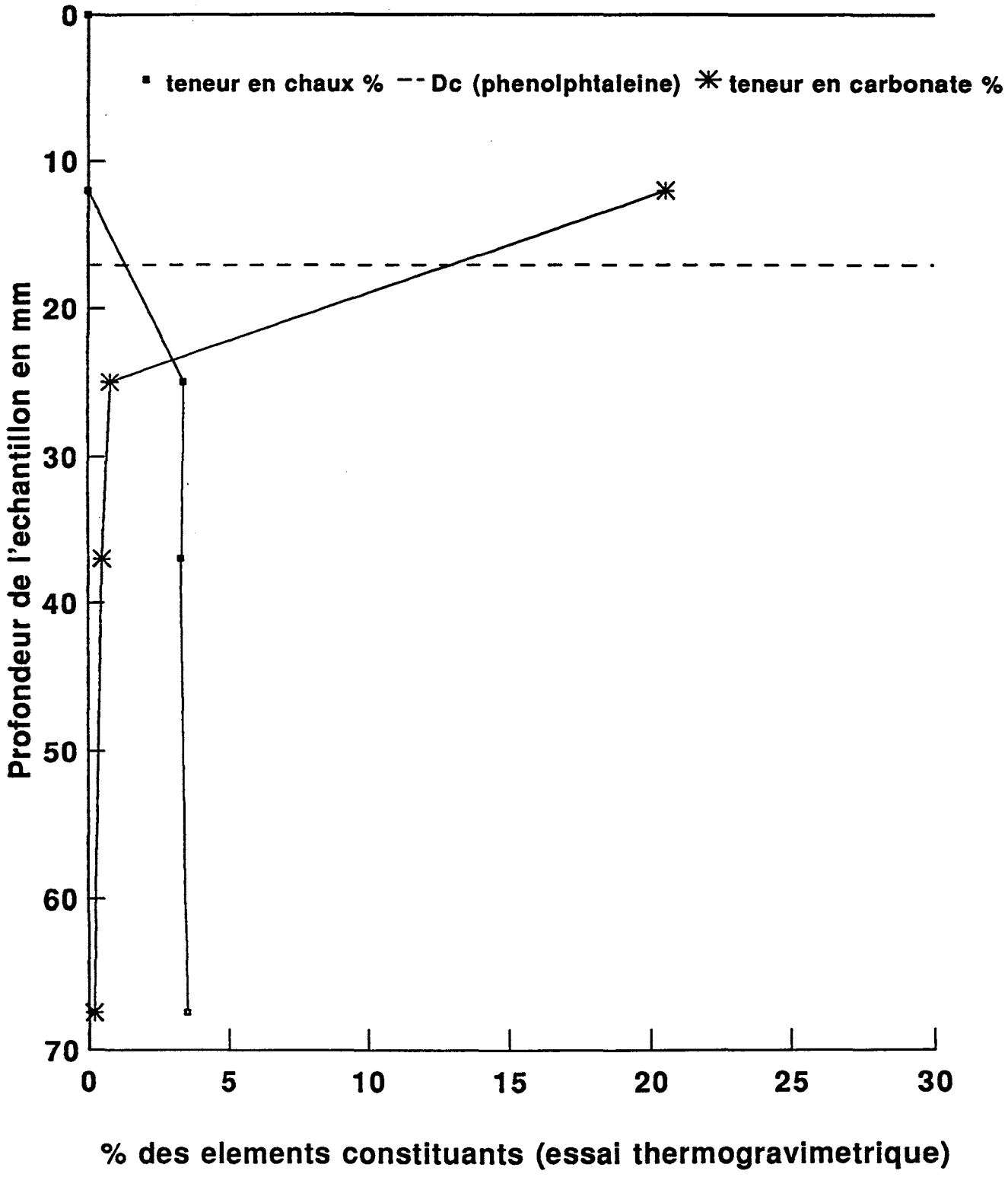
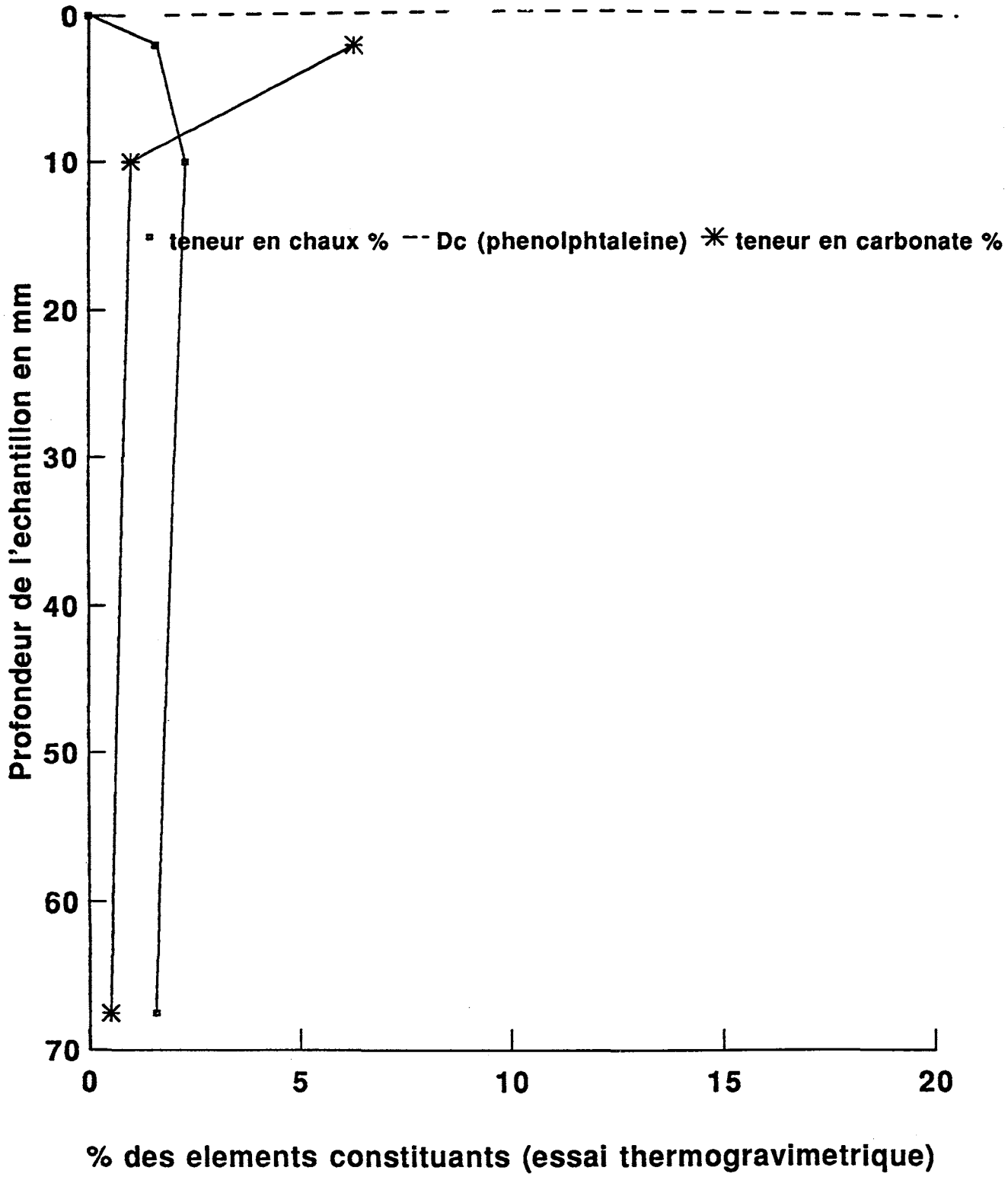



Figure 6V
Resultats comparatifs des essais a la phenolphtaleine et thermogravimetriques - Victoria (carotte F1b)