

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université SAAD DAHLEB- BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Civil

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'Obtention du diplôme de **MASTER** en **Génie Civil**
Option : Structure, Réparation et Coût de Construction

THÈME

*Corrélations entre Essais non Destructifs et Essais
Destructifs sur Béton Ordinaire*

Les membres de jury :

Président: **Dr B. MENADI**

Examineur: **Dr A. BOUIKNI**

Examineur : **M.LANEZ**

Promoteur : Dr S.Kenai

Présenté par :

M^r. BENHAMMOUDA Hocine.

M^r. LATROUS Mounir.

PROMOTION : juillet 2013

Dédicaces

Nous dédions le présent mémoire de fin d'études à :

- *Nos familles respectives qui nous ont soutenus et encouragés tout au long de nos travaux.*
- *Nos amis qui n'ont pas manqué de nous prodiguer conseils et encouragements, et ce, tout au long de la confection de notre mémoire.*

Hocine et Mounir

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu de nous avoir guidés tout au long de notre cursus universitaire, et de nous avoir donné l'énergie nécessaire pour mener à bien ce travail.

Nous tenons aussi à présenter nos vifs remerciements tout particulièrement à notre promoteur et co-promoteur, en l'occurrence Mr Saïd Kenai et Khoudja Ali Benyahia qui ont eu à assumer la mission difficile d'encadrer nos travaux tout au long de la réalisation de ce projet, avec toute la patience et le sérieux requis, sans oublier l'aide précieuse qu'ils nous ont apportés.

Nous prions, nos examinateurs, docteur B. Menadi, président de jury, docteur A. Bouikni et madame Lanez, membres du jury, de trouver ici l'expression de toute notre gratitude pour avoir accepté d'évaluer en toute conscience et en toute objectivité notre projet de fin d'études.

RESUME

La qualité du béton dans les chantiers de construction en Algérie est généralement moyenne à faible. Ceci est mis en évidence par des effondrements suite aux différents séismes. Afin de s'assurer d'une bonne qualité de béton sur site, des essais de contrôle de qualité par écrasement d'éprouvettes sont réalisés. En plus, des essais non destructifs (NDT) sont aussi réalisés en cas de doutes ou en cas de non-conformité. Les essais NDT sont aussi effectués en cas d'évaluation de la résistance post-sismique, changement d'usage ou ajout d'étages. Cependant, l'estimation de la résistance à la compression du béton à partir de ces essais est difficile en raison de la variabilité dans la qualité du béton dans un ouvrage ou même dans les éléments et la variabilité dans les essais eux même. Des abaques et des corrélations pour l'estimation de la résistance à la compression sont disponibles. Cependant, ces corrélations ont été développées pour des bétons de classes de résistance généralement plus élevés que ceux observés dans les chantiers Algériens et pour des matériaux et conditions de mise en œuvre différents. Dans ce mémoire, des essais non destructifs à l'aide de scléromètre et de l'ultrason ont été réalisés sur des poteaux et poutres d'une structure existante. L'écrasement a été effectué au laboratoire sur 203 carottes prélevées. Des essais non destructifs ont aussi été effectués sur les carottes avant leurs écrasements. Des corrélations entre les essais non destructifs et la Résistance sur carottes ont été proposées et comparées aux corrélations proposées par les fabricants et celle proposées par d'autres chercheurs. Les résultats ont montré que l'utilisation des corrélations disponibles dans la littérature surestime la résistance à la compression du béton et donc le manque de sécurité dans le cas de leurs utilisations. Des constatations similaires ont été remarquées lors de l'interprétation des résultats de cette étude ce qui confirme que le béton produit dans les chantiers Algérien est de mauvaise qualité.

Mots clés : Béton ; résistance à la compression, essais non-destructif, scléromètre, ultrason, carottes, corrélations.

ABSTRACT

The quality of concrete in construction sites in Algeria is generally moderate to low. This is highlighted by the collapse following various earthquakes. To ensure a good quality of concrete on site, testing quality control by crushing specimens are made. In addition, non-destructive testing (NDT) are also carried out in case of doubt or in case of non-compliance. The destructive testing tests are also performed when assessing the post-seismic resistance, change of use or adding floors. However, estimating the compressive strength of concrete from these trials is difficult because of the variability in the quality of concrete in a building or even in the elements and the variability in test themselves. Abacus and correlations for estimation of the compressive strength are available. However, these correlations were developed for concrete strength classes generally higher than those observed in the Algerian sites and materials and conditions different implementation. In this paper, non-destructive testing using sclerometer and ultrasound were performed on columns and beams of an existing structure. The crash was made in the laboratory on 203 cores. Non-destructive tests were also conducted on carrots before their crashes. Correlations between non-destructive testing and Resistance on carrots have been proposed and compared with the correlations proposed by manufacturers and that proposed by other researchers. The results showed that the use of correlations available in the literature overestimates the compressive strength of concrete and hence the lack of security in the event of their use. Similar findings were noted when interpreting the results of this study which confirms that the concrete produced in the Algerian sites is poor.

Keywords: concrete, compressive strength, non-destructive testing, test hammer, ultrasound, carrots, correlations.

ملخص

نوعية الخرسانة في ورشات البناء في الجزائر عموما معتدلة الى منخفضة , و هذا ملاحظ من خلال الانهيار جراء الزلازل, للتأكد من النوعية الجيدة للخرسانة في الورشة يتم استعمال الاختبارات المدمرة عن طريق سحق العينات المصنوعة و زد على ذلك الاختبارات الغير المدمرة التي تستعمل أيضا في تقييم مقاومة الخرسانة في حالة الشك او عدم المطابقة مع المواصفات او تقييم البنيات بعد الزلازل او تغيير الاستخدام او إضافة الطوابق.

ومع ذلك تقييم مقاومة الضغط باستعمال الاختبارات الغير المدمرة صعب بسبب التباين في نوعية الخرسانة في البناء او في عناصر الهيكل او أيضا التباين في الاختبارات بحد ذاتها.

منحنيات وارتباطات لتقييم قوة الضغط متاحة ولكن معظمها لتقييم قوة الضغط في فئات اعلى من الملاحظة في ورشات البناء الجزائرية وأيضا لمواد البناء وطريقة استعمالها المختلفة.

في هذه المدكرة استخدمت اختبارات الغير المدمرة باستعمال المطرقة والموجات فوق الصوتية التي استعملت على أعمدة وعوارض لهيكل قائم ثم أجريت اختبارات السحق في المخبر على 203 نواة مأخوذة من مختلف عناصر الهيكل و لكن قبل ذلك أجريت على هذه النوى اختبارات الغير المدمرة أيضا، ارتباطات طورت بين الاختبارات المدمرة و الاختبارات الغير المدمرة وقورنت بالتي طورت من قبل المصنعين و أيضا الباحثين، النتائج اثبتت ان استعمال هذه الأخيرة تضخم نتائج المقاومة و بالتالي انعدام الامن خلال استعمالها

ولوحظت نتائج مماثلة عند تفسير النتائج المتحصل عليها بالارتباطات خلال هذه الدراسة مما يؤكد سوء الجودة للخرسانة المنتجة في الورشات الجزائرية

كلمات البحث: الخرسانة، وقوة الضغط، الاختبارات غير المدمرة، مطرقة اختبار، الموجات فوق الصوتية، والنواة، والارتباطات

Introduction Générale

❖ Généralités

Afin d'assurer une bonne sécurité des structures en béton armé en particulier en cas de charges exceptionnelles ou en cas de séisme, une bonne résistance à la compression du béton est indispensable. La résistance à la compression du béton est influencée par plusieurs facteurs dont les plus importants sont la qualité des constituants et leurs dosages, le rapport Eau/Ciment (E/C), la mise en œuvre, la vibration et la cure humide et l'environnement. La fabrication du béton en Algérie se fait généralement sur chantier et souvent de manière manuelle, ce qui engendre en générale un béton de résistances moyennes à faibles et par conséquent une non-conformité avec les exigences normatives et structurales imposées par le cahier des charges.

Le contrôle de la qualité du béton sur site est généralement effectué par la méthode de contrôle destructif effectué sur des cubiques ou cylindriques. En cas de non-conformité, des carottes sont prélevées pour une estimation de la résistance in-situ. Le carottage est coûteux et les structures examinées peuvent être affectées. En plus, les carottes prélevées ne sont généralement pas représentatifs du béton de la structure à cause de la différence de mise en place, de serrage et de cure, qui sont les principaux facteurs affectant la résistance du béton.

Par conséquent, il est fait recours à des essais non destructifs (NDT) offrant un moyen pratique et fiable au contrôleur du béton dans le but d'apprécier la qualité réelle du béton in situ sans affecter le comportement structural des éléments.

Des essais non destructifs (NDT) sont généralement réalisés sur site en cas de non-conformité. Cependant, l'estimation de la résistance à la compression à partir des essais non-destructifs est difficile en raison des multitudes de corrélations et abaques disponibles.

Plusieurs chercheurs ont développés des modèles de corrélations empiriques reliant les résistances du béton aux mesures non destructives correspondantes, chacun de ces modèles tient compte de l'environnement et des matériaux utilisés. Cependant, lors de l'utilisation de ces modèles pour le béton Algérien, les résultats obtenus sont contradictoires avec ceux observés par les essais sur carottes. Ceci indique clairement la nécessité de développer des corrélations spécifiques aux bétons à base des matériaux locaux et qui reflètent les conditions et les pratiques de nos chantiers.

❖ **But du travail**

Notre présent travail consiste à élaborer des corrélations reliant des essais non destructifs par Ultrason et Scléromètre et des essais destructifs par la résistance à la compression des carottes prélevées sur différents éléments d'une structure existante. Une comparaison entre les corrélations proposées et celles fournis par les fabricants des équipements d'essais non destructifs ou encore celles développées par d'autres chercheurs sera réalisée.

Plan des chapitres

Après avoir présenté une introduction générale qui reflète la nécessité et la difficulté d'estimation de la résistance à la compression du béton sur site, le mémoire est subdivisé en plusieurs chapitres :

- ✚ Le premier chapitre présente une revue bibliographique sur la qualité du béton et les facteurs qui l'influencent.
- ✚ Le deuxième chapitre est une synthèse bibliographique des essais non destructifs et à leur rôle dans le contrôle de la qualité du béton;
- ✚ Le troisième chapitre présente l'étude expérimentale, expliquant les étapes suivies durant le déroulement des essais qui ont été réalisés.
- ✚ Dans le quatrième chapitre, les résultats des essais sont présentés et discutés.
- ✚ Enfin, des conclusions générales et des recommandations pour futurs travaux sont données.

Table des Matières

Liste des Figures

Liste des tableaux

Introduction Générale

| | |
|---------------------------|---|
| ❖ Généralité..... | 2 |
| ❖ But du travail..... | 3 |
| ❖ Plan des chapitres..... | 3 |

Chapitre 1

Qualité du Béton

| | |
|---|---|
| 1.1 Généralité..... | 5 |
| 1.2 Qualité du béton..... | 6 |
| 1.3 Critères d'évaluation de la qualité..... | 6 |
| 1.3.1 Ouvrabilité..... | 6 |
| 1.3.2 Durabilité..... | 6 |
| 1.3.3 La résistance..... | 7 |
| 1.4 Les facteurs influençant la résistance..... | 7 |
| 1.4.1 La qualité du ciment | 7 |
| 1.4.2 Dosage en ciment et en eau | 7 |
| 1.4.3 Le choix des granulats | 7 |
| 1.4.4 La qualité de l'eau de gâchage | 8 |
| 1.4.5 Les adjuvants | 8 |
| 1.4.6 Le malaxage du béton | 8 |
| 1.4.7 La qualité d'exécution..... | 8 |
| 1.4.7.1 Le transport | 8 |

| | |
|--|----|
| 1.4.7.2 Mise en place du béton | 9 |
| 1.4.7.3 Vibration du béton | 9 |
| 1.4.7.4 Cure du béton | 9 |
| 1.4.8 Impacte des Conditions climatiques sur la résistance du béton..... | 10 |
| 1.4.9 Age du béton | 11 |
| 1.5 La Qualité du Béton en Algérie | 11 |
| 1.6 Conclusion | 13 |

Chapitre 2

Essais non Destructifs sur Béton Durci

| | |
|---|----|
| 2.1 Contrôle de la qualité du béton..... | 15 |
| 2.2 Utilité et avantages des essais non destructifs (END)..... | 15 |
| 2.3 Limites des essais non destructifs..... | 16 |
| 2.4 Différents essais non destructifs..... | 16 |
| 2.4.1 Inspection Visuelle..... | 17 |
| 2.5 Scléromètre (marteau de rebondissement de Schmidt)..... | 17 |
| 2.5.1 Principe fondamental..... | 17 |
| 2.5.2 Description de l'appareil..... | 17 |
| 2.5.3 Surface de l'essai..... | 19 |
| 2.5.3.1 Choix de la surface..... | 19 |
| 2.5.3.2 Préparation..... | 20 |
| 2.5.4 Fonctionnement de l'appareil..... | 20 |
| 2.5.5 Modèles de corrélation entre la résistance et l'indice de rebondissement..... | 21 |
| 2.5.6 Avantages et limites d'essai du marteau de rebondissement..... | 21 |
| 2.5.7 Facteurs influençant la mesure de l'indice de rebondissement..... | 22 |
| 2.5.8 Normalisation des méthodes de la dureté de surface..... | 23 |
| 2.6 Ultrason (Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique)..... | 24 |
| 2.6.1 Introduction..... | 24 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.6.2 | Théorie de la propagation de l'impulsion à travers le béton..... | 24 |
| 2.6.3 | Principe fondamental..... | 25 |
| 2.6.4 | Description de l'appareil..... | 26 |
| 2.6.5 | Procédé de mesure..... | 27 |
| 2.6.6 | Applications..... | 30 |
| 2.6.6.1 | Estimation de la résistance du béton | 30 |
| 2.6.7 | Facteurs affectant la vitesse d'impulsion ultrasonique..... | 31 |
| 2.6.7.1 | Taille des agrégats, terrassement, Type et contenu..... | 31 |
| 2.6.7.2 | Type de Ciment..... | 31 |
| 2.6.7.3 | Rapport Eau-Ciment..... | 31 |
| 2.6.7.4 | Utilisation des Adjuvants..... | 31 |
| 2.6.7.5 | Age du béton..... | 32 |
| 2.6.7.6 | Contact des transducteurs..... | 32 |
| 2.6.7.7 | Température du béton..... | 32 |
| 2.6.7.8 | L'humidité et Condition de durcissement du béton..... | 32 |
| 2.6.7.9 | Longueur de parcours..... | 32 |
| 2.6.7.10 | Taille et forme des spécimens..... | 33 |
| 2.6.7.11 | Efforts appliqués..... | 33 |
| 2.6.7.12 | Présence des armatures..... | 34 |
| 2.6.8 | Modèles de corrélation entre la résistance et la vitesse ultrasonique..... | 34 |
| 2.6.9 | Limites et avantages de l'essai vitesse d'impulsion ultrasonique..... | 35 |
| 2.8 | Méthode combinée des essais non destructifs..... | 35 |
| 2.9 | Conclusion..... | 35 |

Chapitre 3

Etude Expérimentale

| | |
|---------------------------------------|----|
| 3.1 Introduction..... | 38 |
| 3.2 Présentation de l'ouvrage..... | 38 |
| 3.3 Etude sur Site..... | 38 |
| 3.3.1 Matériel utilisé | 38 |
| 3.3.2 Déroulement des essais..... | 39 |
| 3.3.3 Procédure d'essais..... | 40 |
| 3.4 Essais en Laboratoire..... | 45 |
| ❖ Essais d'Absorption Capillaire..... | 50 |

Chapitre 4

Présentation et Discussion des Résultats

| | |
|--|----|
| 4.1 Introduction..... | 53 |
| 4.2 Résultats des Essais Effectués..... | 53 |
| 4.3 Etude statistique sur les résultats obtenus par scléromètre..... | 56 |
| 4.4 Etude statistique sur les résultats obtenus par Ultrason..... | 58 |
| 4.5 Etude statistique sur les résultats obtenus par Ecrasement des Carottes..... | 60 |
| 4.6 Corrélations..... | 62 |
| 4.6.1 Corrélation entre l'Indice de rebondissement et la Résistance | 63 |
| 4.6.1.1 Corrélations Tous les éléments de la structure..... | 62 |
| 4.6.1.2 Corrélations Tous les éléments Par Bloc..... | 63 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 4.6.1.3 | Corrélations des indices mesurés sur les carottes correspondantes..... | 64 |
| 4.6.1.4 | Corrélations pour tous les poteaux et toutes les poutres..... | 65 |
| 4.6.1.5 | Corrélations pour poteaux seuls..... | 66 |
| 4.6.1.5.1 | Corrélation Par Bloc..... | 66 |
| 4.6.1.5.2 | Corrélation Par Niveau..... | 67 |
| 4.6.1.5.3 | Corrélation avec les mesures sur carottes correspondantes..... | 69 |
| 4.6.1.6 | Corrélations pour poutres..... | 70 |
| 4.6.1.6.1 | Corrélation Par Bloc..... | 70 |
| 4.6.1.6.2 | Corrélation Par Niveau..... | 71 |
| 4.6.1.6.3 | Corrélation avec les mesures sur Carottes correspondantes..... | 73 |
| 4.6.1.7 | Etude comparative aux autres modèles | 74 |
| 4.6.2 | Corrélation entre vitesses Ultrasoniques et la Résistance | 76 |
| 4.6.2.1. | Corrélations tous les éléments de la structure..... | 76 |
| 4.6.2.2 | Corrélations tous les éléments Par bloc..... | 77 |
| 4.6.2.3 | Corrélations tous les éléments avec les carottes correspondantes..... | 78 |
| 4.6.2.4 | Corrélations pour tous les poteaux et toutes les poutres..... | 79 |
| 4.6.2.5 | Corrélations pour Eléments Poteaux..... | 80 |
| 4.6.2.5.1 | Corrélation par Bloc..... | 80 |
| 4.6.2.5.2 | Corrélation par Niveau..... | 81 |
| 4.6.2.5.3 | Corrélation avec les carottes correspondantes..... | 82 |
| 4.6.2.6 | Corrélations Pour Eléments Poutres..... | 85 |
| 4.6.2.6.1 | Corrélation Par Bloc..... | 85 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.6.2.6.2 | Corrélation Par Niveau..... | 85 |
| 4.6.2.3.3 | Corrélation avec les Carottes correspondantes..... | 87 |
| 4.6.2.7 | Etude comparative aux autres modèles..... | 88 |
| 4.6.3 | Corrélation entre la résistance et l'absorption capillaire..... | 90 |
| 4.6.3.1 | Pour toutes les Carottes..... | 90 |
| 4.6.3.2 | Par blocs..... | 91 |
| 4.7 | Modèle proposé par corrélation combinée..... | 93 |
| | | |
| ❖ | Conclusion Générale et Recommandations..... | 94 |
| ❖ | Annexe | 97 |
| ❖ | Références Bibliographiques..... | 126 |

Chapitre 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE :
QUALITE DU BETON

1.1 Généralité

Le béton est un matériau composite utilisé depuis des siècles dans le domaine de la construction. Il est fabriqué à partir de granulats naturels ou artificiels, sable, gravillons ou granulats légers agglomérés par un liant hydrique habituellement du ciment, pour avoir les performances voulues. Des adjuvants sont aussi ajoutés pour améliorer les caractéristiques du béton à l'état frais ou durci. La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, c'est à dire son aptitude à remplir n'importe quel volume (coffrage, moule...) et à enrober convenablement les armatures. La résistance à la compression est la caractéristique l'une des plus importante du béton durci.

Le bétonnage constitue la partie la plus critique pour réussir à constituer l'ossature mécanique appropriée dont dépendra la sécurité de l'ouvrage, mais dans nos chantiers cette opération est inadéquate. La qualité et le dosage des composants ainsi que la mise en œuvre jouent tous un rôle important sur le produit final.

La production du béton se fait essentiellement sur chantier et souvent de manière manuelle par des ouvriers sans aucune qualification adéquate. Le malaxage manuel est une opération rude et même s'il s'agit d'un béton de bonne composition le mélange n'est jamais complet.

La qualité du béton à l'état durci dépend des caractéristiques du squelette pierreux, de la pâte de ciment durci et de l'adhérence entre les deux.

Le non-respect des critères de qualité et de dosage en sable est tout aussi préjudiciable et plus fréquent, car le sable, naturel ou de carrière, utilisé dans nos chantiers est loin de répondre aux normes.

La maîtrise de la production du béton ne peut se faire que via l'installation d'usines de fabrication du béton prêt à l'emploi. Cela se fait dans la plupart des pays. Une vingtaine de producteurs homologués et contrôlés peuvent couvrir les besoins d'une grande agglomération. Il est plus facile de contrôler une vingtaine de producteurs de béton que d'être présents sur des milliers de chantiers.

1.2 Qualité du béton

La qualité de béton dépend du dosage, de la mise en œuvre et de la qualité des constituants. C'est l'art de créer un nouveau mélange de matériaux qui aura la capacité de fournir la crédibilité de défendre ces caractéristiques face aux altérations et satisfaire les exigences techniques et économiques des utilisateurs. La qualité est généralement mesurée par la résistance à la compression ou par des essais de durabilité.

1.3 Critères à d'évaluation de la qualité

1.3.1 Ouvrabilité

C'est une qualité du béton à l'état frais qui permet la maniabilité tout en conservant son homogénéité, elle doit être considérée comme une qualité aussi importante que la résistance; un simple défaut d'ouvrabilité sur chantier conduit à un état préjudiciable pour la résistance notamment la majoration de dosage en eau afin d'obtenir un béton suffisamment plastique et lors du transport. Sur le plan pratique la maniabilité se traduit par la facilité de mise en œuvre et le remplissage parfait des coffrages, l'ouvrabilité peut s'apprécier par des mesures de plasticité, les plus couramment utilisés sont l'affaissement du cône d'Abrams, étalement à la table à secousse, la méthode Slump-Walz wa et la méthode Vébé.

1.3.2 Durabilité

La durabilité de l'ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu. Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations physico-chimiques tout en conservant son esthétique. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, aux besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service et à maintenir son niveau de fiabilité. On note que la durabilité ne dépend pas d'une bonne résistance, ils sont considérés séparément en terme d'étude. La durabilité dépend de la mise en œuvre et de la bonne exécution.

Pour évaluer la durabilité d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation et d'étudier la résistance du béton vis-à-vis de ces dégradations, si l'on exclut d'une part les événements accidentels et d'autre part les effets à long terme des sollicitations mécaniques tel que la fatigue due à des sollicitations répétées ou le fluage pouvant engendrer des pertes de précontraintes ou encore l'abrasion [7]. Parmi les facteurs qui influencent directement la durabilité du béton, La corrosion des armatures qui est

due principalement au manque d'enrobage est résumée en deux phases. La première phase est la phase d'incubation qui présente le milieu environnant, et la deuxième est la phase de propagation qui correspond à la croissance de la rouille.

1.3.3 La résistance

Le béton résiste mieux à la compression qu'à la traction, la particularité de cette caractéristique est qu'elle évolue en fonction du temps. Cependant la résistance requise à l'âge de 28 jours dite résistance spécifique, sur laquelle le calcul de dimensionnement se base, se mesure par la compression axiale des éprouvettes cylindriques. La résistance à la traction du béton se fait par plusieurs essais de traction directe ou essais brésilien.

1.4 Les facteurs influençant la résistance

Le béton composé de plusieurs matériaux, peut être considéré comme hétérogène, l'évolution de la résistance du béton durci dépend des propriétés de ces composants. Les facteurs qui influencent la résistance sont :

1.4.1 La qualité du ciment

Le choix de type de ciment est en fonction de sa classe vraie, et des critères de mise en œuvre. Cette classe est la résistance moyenne obtenue à 28 jours sur des éprouvettes de mortier normalisé.

1.4.2 Dosage en ciment et en eau

Le rapport E/C est l'un des facteurs les plus importants affectant la résistance à la compression. La résistance croît en même temps que le dosage en ciment et elle décroît avec l'augmentation du dosage en eau.

1.4.3 Le choix des granulats

Les granulats doivent permettre la conception d'un squelette avec un minimum de vides et un maximum d'adhérence avec la pâte de ciment, la simple rupture de cette adhérence influe sur la résistance du béton.

Par conséquent, le choix des granulats en termes de dureté et d'adhésivité demeure inéluctable, ils doivent être propres et dénués de toute autre matière.

Pour combler le maximum des vides et avoir une bonne ouvrabilité il faut choisir les granulats de toutes classes, avec une granularité continue.

Pour permettre une mise en œuvre correcte du béton il est essentiel que la taille du plus gros granulats ne s'oppose pas au déplacement des granulats entre les armatures.

1.4.4 La qualité de l'eau de gâchage

L'eau est le liant hydraulique naturel qui forme la pâte avec le ciment, toute matière étrangère à la composition de l'eau peut aboutir à affecter les caractéristiques mécaniques du béton, dont la résistance, et diminue la compacité, le gonflement, la corrosion ou le retardement de prise, tel que les matières insolubles, les phosphates et les nitrates, les sulfates et le soufre.

1.4.5 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits liquides ou pulvérulents qui s'additionnent en faible quantité au mélange de la pâte et des granulats. Pour améliorer ou optimiser les caractéristiques du béton, tel que la durabilité, l'ouvrabilité, l'adaptation au comportement pendant la prise, par conséquent, il peut présenter certaines fonctions secondaires définies dans la norme Européenne [8].

1.4.6 Le malaxage du béton

Le malaxage est une opération destinée à l'amélioration et à l'homogénéisation du mélange. Le but est de couvrir les agrégats par la pâte de ciment, un béton est dit homogène lorsque sa composition est identique en tout point [3] pour assurer la réussite de cette opération, il faut choisir un matériel adapté, déterminer un temps de malaxage suffisant, et régler une vitesse pas très élevée pour éviter un début de ségrégation.

1.4.7 La qualité d'exécution

1.4.7.1 Le transport

De la production du béton à la mise en place, cette étape s'appelle le transport, la résistance des bétons transportés à une distance plus de 5 km est inférieure d'environ 10% à celle coulés sur place. La cause possible serait due aux problèmes de ségrégation du mélange suite aux diverses sollicitations que subit le béton frais lors de son déplacement [1], le délai séparant la

fabrication de la mise en place complète du béton transporté ne doit pas excéder le début de prise estimé de 1 h à 1 h 30 mn.

Toutes les précautions doivent être prises pour éviter, en cours de transport, une évaporation excessive ou une intrusion de matières étrangères [2].

1.4.7.2 Mise en place du béton

Avant la mise en place du béton il faut s'assurer de la propreté du coffrage en utilisant l'air comprimé. Après ça le béton doit être placé dans la position finale et versé verticalement à une hauteur pas très élevée. Il ne faut pas ajouter de l'eau au béton après placement, et éviter la mise en place lors de trop fortes pluies pour éviter un excès d'eau dans le béton et surtout à sa surface.

1.4.7.3 Vibration du béton

La vibration du béton est l'opération de consolidation pour remplir tous les vides et en particulier le contour des armatures, c'est la condition nécessaire à l'adhérence. Le béton est assimilé du point de vue rhéologique à un fluide de Bingham, c'est-à-dire un fluide possédant une cohésion et une viscosité. Pour une vibration de plus que 12 000 tours /minute le mortier perd sa cohésion et sa viscosité, les granulats et les bulles d'air sont alors soumis à la poussée d'Archimède, donc les bulles d'air vont remonter et les gros granulats migrent vers le bas.

La mauvaise utilisation du vibreur et le manque ou l'excès de vibration peut conduire à des problèmes de ségrégation, à une faible résistance, à des nids de cailloux et des poches d'air. Par ailleurs, une durée insuffisante donne un béton peu compact et de faible résistance, par contre une durée prolongée provoque une ségrégation des granulats.

La durée approximative de vibration à l'aiguille est de 1 à 2 minutes pour un béton ferme, et 20 secondes pour un béton plastique [3].

1.4.7.4 Cure du béton

ACI comité 308 : « la cure est la procédure utilisée pour maintenir une quantité d'humidité suffisante et une température favorable dans le béton durant l'hydratation du ciment si bien que les propriétés désirées sont développées » [9].

DTR Algérien : « la cure a pour objet de maintenir le béton dans l'état d'humidification nécessaire à un temps sec et Chaud ».

La cure doit être commencée dès le début de prise du béton et on distingue deux types de procédés de cure :

- Cure par protection temporaire imperméable c.à.d. maintenir le coffrage en place le temps nécessaire pour la cure, sinon mettre un film plastique ou une bâche étanche.
- Cure par humidification c'est garder l'eau en présence continuellement réalisé par immersion ou arrosage.

La cure influe sur la résistance du béton au jeune âge; la dessiccation limite l'évolution de la résistance, l'humidité inférieure à 80% arrête la réaction d'hydratation. La température élevée accélère la réaction qui entraîne une augmentation de résistance à court terme et une diminution à long terme [2].

Quand la cure n'est pas effectuée, il résulte une réduction de 40% à 50% de la résistance à la compression, par contre, l'augmentation de la durée de cure de 7 à 14 J augmente la résistance de 20% et diminue la porosité. [3].

1.4.8 Impacte des Conditions climatiques sur la résistance du béton

La température joue un grand rôle dans la réaction d'hydratation en l'accélération et en changeant la nature des hydrates formés dans le béton. La chaleur accélère la prise et le durcissement du béton tandis que le froid allonge la durée de prise et peut même l'arrêter complètement.

Concernant les conditions hygrométriques relatives à la pluviométrie, la cure humide est nécessaire pour maintenir le processus d'hydratation du ciment. Kenai [4] a montré que l'une des principales raisons de la chute de résistance du béton dans la période estivale serait due à l'utilisation excessive d'eau de gâchage. Un manque de protection peut provoquer sur une éprouvette de contrôle une chute de résistance de l'ordre de 10% ; alors que sur l'ouvrage, indépendamment de la baisse de résistance, des risques de fissuration sont en plus à craindre [2].

1.4.9 L'âge du béton

La connaissance de l'évolution des propriétés mécaniques du béton au jeune âge est importante dans la mesure où ces évolutions conditionnent la réponse mécanique du matériau aux déformations d'origine thermique et chimique.

Au début de sa prise et de son durcissement, le béton comme tous les matériaux cimentaires subit des variations de volume significatives, qui se manifestent dès les premières heures qui suivent sa fabrication, et qui sont provoquées en grande partie par l'hydratation du ciment. En pratique, il arrive que ces changements volumiques soient si importants qu'ils mènent à la fissuration de l'ouvrage. Au cours des dernières années, de nombreuses études ont ainsi démontrées que les problèmes de fissuration du béton au jeune âge peuvent être directement liés aux déformations endogènes de la pâte de ciment qui se sont produites dès les premières heures de la réaction d'hydratation. Toutefois, la connaissance incomplète des propriétés du béton au jeune âge limite la possibilité d'étudier les structures en béton et complique les prévisions de fissuration dans les jours qui suivent la mise en place du béton. Le béton est un matériau évolutif, dont la maturation progressive se caractérise par le passage d'un état presque liquide à un matériau viscoélastique en l'espace de quelques heures, suivi d'une évolution ultérieure vers un matériau durci présentant des résistances mécaniques importantes [5].

La résistance mécanique du béton évolue en fonction du temps, en tenant compte des conditions convenables de production; après 7 jours de prise, un béton a acquis de 40 à 60 % de sa résistance finale et de 60 à 80% au bout de 28 jours.

1.5 La Qualité du béton en Algérie

La qualité du béton en Algérie est généralement moyenne à faible. Une étude statistique des sinistres dans l'Est de l'Algérois réalisée par Hannachi et Kenai [6] et basée sur des rapports d'expertises du sur 205 cas pathologiques durant la période 1982-1992 dans les wilayas de Tizi-Ouzou, Bouira et Boumerdès a montré la qualité inadéquate du béton qui était responsable de plusieurs cas pathologiques.

Lechani, Hannachi et Yantren, [33] ont analysé les résultats d'écrasement de 4180 éprouvettes de béton à différents âges 7, 14, 21 et 28 jours issues de différentes régions de la wilaya de Tizi-Ouzou et analysées durant la décennie 1988-1993. Le tableau 1.1 suivant donne la résistance caractéristique(en bars) et l'écart-type en fonction de l'âge du béton.

Tableau 1.1- Essais de résistance effectués sur éprouvettes de 1988 à 1993 [33]

| | Variabes | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 |
|--------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| à 7j | Nombre d'observation | 287 | 241 | 139 | 193 | 109 | 88 |
| | Moyenne | 185,01 | 198 ,39 | 201,65 | 203,75 | 189,09 | 188,62 |
| | Ecart-type | 60,34 | 47,72 | 54,03 | 53,05 | 71,58 | 43,88 |
| | Rc | 136,73 | 160,21 | 158,42 | 161,31 | 131,82 | 153,51 |
| à 14j | Nombre d'observation | 223 | 121 | 86 | 113 | 65 | 196 |
| | Moyenne | 221,02 | 220,40 | 236,69 | 233,69 | 236,84 | 233,98 |
| | Ecart-type | 54,77 | 67,04 | 63,28 | 67,34 | 52,48 | 45,78 |
| | Rc | 177,20 | 166,76 | 185,95 | 179,81 | 194,85 | 197,35 |
| à 21j | Nombre d'observation | 194 | 76 | 35 | 84 | 50 | 102 |
| | Moyenne | 262,07 | 242,80 | 254,86 | 252,25 | 240,48 | 251,50 |
| | Ecart-type | 55,51 | 44,64 | 62 ,13 | 51,19 | 68,70 | 61,65 |
| | Rc | 217,59 | 207,08 | 205,13 | 211,29 | 185,52 | 292,18 |
| à 28j | Nombre d'observation | 351 | 241 | 188 | 263 | 169 | 206 |
| | Moyenne | 288,25 | 275,03 | 173,45 | 277,75 | 259,88 | 272,58 |
| | Ecart-type | 69,84 | 64,01 | 67,72 | 67,66 | 62,88 | 66,25 |
| | Rc | 232,37 | 223,82 | 219,27 | 223,62 | 209,57 | 219,58 |

La résistance caractéristique moyenne sur la période 1988-1993 n'atteint pas la résistance préconisée par la réglementation de 270 bars. D'autre part, ces résistances décroissent d'année en année. Cette chute de résistance semble être due à la qualité médiocre des agrégats utilisés outre l'influence des conditions de transport, des moyens de fabrication et des conditions climatiques, le tableau 1.2 illustre l'influence de ces facteurs :

Tableau 1.2- Influence du transport sur la résistance du béton [33]

| Mode de coulage | Nombre d'observations | Résistance caractéristique (bars) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Sur place | 1241 | 221 |
| Transporté | 302 | 205 |

La résistance des bétons des éléments coulés sur place est supérieure à 10% environ à ceux transportés à une distance supérieure à un rayon de 5 km. La cause est la ségrégation du béton frais en cours de transport.

Tableau 1.3- Influence des moyens de fabrication [33]

| Provenance | Nombre d'observations | Résistance caractéristique (bars) |
|------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Bétonnière | 831 | 228 |
| Centrale | 712 | 215 |

La résistance est toujours inférieure à la résistance préconisée, qui est expliquée par le fait que les centrales à béton ne font pas l'objet d'un contrôle régulier, et par l'absence des essais de convenance particulièrement pour les bétonnières.

1.6 Conclusion

La qualité du béton est généralement appréciée par sa résistance à la compression. Plusieurs facteurs affectent la résistance la compression dont la composition du béton, la qualité des constituants et leurs dosages, le rapport Eau/Ciment, le dosage en ciment, la vibration, la durée de cure humide. En Algérie, plusieurs études statistiques ont montré que la qualité du béton produit dans les chantiers Algérien est moyenne à faible et qu'une amélioration de la technologie du béton reste à faire. Cette situation produit des cas de non-conformité et des conflits entre les différents intervenants. Par conséquent, il est fait recours à des essais non destructifs pour s'assurer de la conformité ou l'étendu de la non-conformité. Le chapitre 3 présente les essais non destructifs souvent utilisé dans le béton.

Chapitre 2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE :
ESSAIS NON DESTRUCTIFS SUR
BETON DURCI

2.1. Contrôle de la qualité du béton

La production du béton en Algérie notamment dans le domaine du bâtiment se fait essentiellement sur chantier, et souvent de manière manuelle. Cette pratique entraîne généralement un mauvais dosage des constituants et un excès d'eau et également présente un changement de formulation du béton fabriqué d'une gâchée à une autre. C'est pourquoi le contrôle de la qualité du béton durant toute cette opération demeure nécessaire.

L'expérience dans le domaine du contrôle de la qualité de béton dans les chantiers de réalisation met en évidence, qu'à de rares exceptions, les bétons produits sont en deca des spécifications exigées par la réglementation. Dans ce cas précis l'ingénieur exige des essais pour confirmer ou infirmer la résistance des bétons mise en cause [6].

2.2. Utilité et avantages des essais non destructifs (NDT)

Les essais non destructifs permettent d'évaluer et de surveiller l'évolution, de la qualité du béton in situ durant la période de cure d'une manière relativement simple, rapide, et rentable. Cette méthode permet aussi d'amoindrir le nombre de carottes habituellement exigées pour l'évaluation du béton.

Les essais non destructifs ont un atout considérable qui s'exprime par le gain de temps et la collecte d'un volume de données significatives.

Le contrôle non destructif est une option à considérer dans l'étude du béton in situ pour déterminer:

- la densité et la résistance du béton dans une structure;
- l'endroit des armatures et l'enrobage des aciers;
- le nombre et la section des barres;
- l'ampleur des défauts tels que la corrosion;
- l'endroit du câblage, de la tuyauterie, de la canalisation, etc., qui sont incorporés dans le béton;
- si des défauts internes existent dans le béton tel que les vides, fissures, décollements, nids de gravier, manque de liaison avec les barres, etc.;
- Existence de lien entre les plaques en acier collées avec époxydes et le béton;
- l'homogénéité du mélange du béton;
- le manque de coulis dans les gaines de post-tension.

2.3. Limites des essais non destructifs

Le principal désavantage des essais non destructifs réside dans le fait qu'au stade actuel, ils ne peuvent pas fournir au constructeur des données suffisamment précises pour remplacer totalement les essais destructifs, au moins dans les principaux domaines d'application.

Les essais non destructifs donnent des mesures indirectes (l'indice de rebondissement, la vitesse d'impulsion ultrasonique,...) qui ne sont pas reliées directement aux propriétés des bétons. En outre, les données fournies par ces essais sont très difficiles à interpréter, malgré plusieurs travaux visant à améliorer les essais non destructifs se poursuivent. Ceci est dû aux problèmes de précision des techniques d'application, d'étalonnage des appareils et de l'hétérogénéité du matériau [2].

2.4. Différents essais non destructifs

Les techniques permettant d'effectuer les différents essais pour déterminer les caractéristiques du béton sont nombreux et de complexités variables telle que :

- Essais de résistance à la pénétration.
- Essais d'arrachement (Pull-Out test, CAPO Test).
- Méthodes radioactives.
- Mesure de l'enrobage (covermeter).
- Mesure de la résistivité du béton.
- Impact-echo.
- Méthode radar.
- Maturation.

Mais lors des expertises de chantier de réalisation en Algérie, l'ingénieur a souvent recours aux essais suivants:

- Essais par scléromètre.
- Essais par ultrason.

Mais avant de débiter toute investigation, il est nécessaire d'effectuer une inspection visuelle de l'ouvrage en question, afin d'établir les causes possibles des dommages et de pouvoir interpréter les résultats obtenus par les essais non destructifs.

2.4.1. Inspection Visuelle

Avant le début de toute investigation, il est nécessaire d'effectuer une inspection visuelle en vue d'établir les causes possibles des dommages d'une structure en béton.

L'inspection visuelle est la méthode la plus commune employée pour l'évaluation des états des ouvrages et comporte la détection des signes de la détérioration tels que les fissures, les déformations excessives, la corrosion, l'écaillage, la fuite d'eau et l'état des joints. Cependant elle ne permet pas d'identifier les problèmes quand l'état de détériorations est invisible. Il est donc nécessaire d'avoir recours à d'autres méthodes pour y parvenir.

2.5. Scléromètre (marteau de rebondissement de Schmidt)

2.5.1. Principe fondamental

Une masse propulsée par un ressort projette une tige de percussion au contact de la surface. Le résultat de l'essai est exprimé par la mesure de la distance de rebondissement de la tige. Cette distance est d'autant plus grande que la dureté de surface est élevée [10, 11].

2.5.2. Description de l'appareil

Des scléromètres qui se différencient par la valeur de l'énergie d'impact, type de recul et leur destination à l'essai sont disponibles dans le commerce pour les essais de béton de classes de résistance et de types différents. Il convient que chaque type de scléromètre soit utilisé exclusivement avec le béton dont la classe de résistance et le type correspondent à l'usage auquel il (elle) se destiné.

Il existe plusieurs types de scléromètres qui se différencient par la valeur de l'énergie d'impact, type de recul et leur destination à l'essai comme le montre le Tableau.2.1.

Le scléromètre le plus adapté au béton ordinaire est le marteau de rebondissement de Schmidt de modèle N qui est montré dans la Figure 2.1. Il pèse environ 1.8 kg et convient aux essais en laboratoire comme aux essais sur chantier.

Une vue en coupe schématique du scléromètre de modèle N est montrée dans la (Figure 2.2.) Les composants principaux incluent dans le corps : la tige de percussion, la masse du marteau et le ressort principal. D'autres dispositifs y incluent : un mécanisme de verrouillage qui ferme la masse du marteau à la tige et un curseur coulissant pour mesurer le rebondissement de la masse du marteau. La distance de rebondissement est mesurée sur une échelle arbitraire

marquée de 10 à 100. La distance de rebondissement est enregistrée comme un "indice de rebondissement" correspondant à la position du curseur sur l'échelle [10, 11].

Tableau 2.1- Différents modèles de scléromètre. [2]

| <i>Modèle</i> | <i>Energie d'impact (k.gf.m)</i> | <i>Type de recul</i> | <i>Domaine d'application</i> |
|---------------|--------------------------------------|----------------------|---|
| L | 0.075 | <i>Linéaire</i> | <ul style="list-style-type: none"> • <i>Eléments minces en béton (e < 10 cm).</i> • <i>Bétons à base des granulats légers.</i> |
| M | 3.000 | <i>Linéaire</i> | <i>Eléments massifs</i> |
| N | 0.225 | <i>Linéaire</i> | <i>Bétons usuels</i> |
| NA | 0.225 | <i>Linéaire</i> | <i>Contrôle de la qualité du béton sous l'eau</i> |
| NR | 0.225 | <i>Linéaire</i> | <i>Identique au modèle N mais avec un dispositif d'enregistrement des mesures</i> |
| PT | 0.090 | <i>Angulaire</i> | <i>Contrôle de la qualité des matériaux de très faible résistance (Rc < 5MPa)</i> |



Fig. 2.1-Marteau de rebondissement de Schmidt de type N en cours d'utilisation.

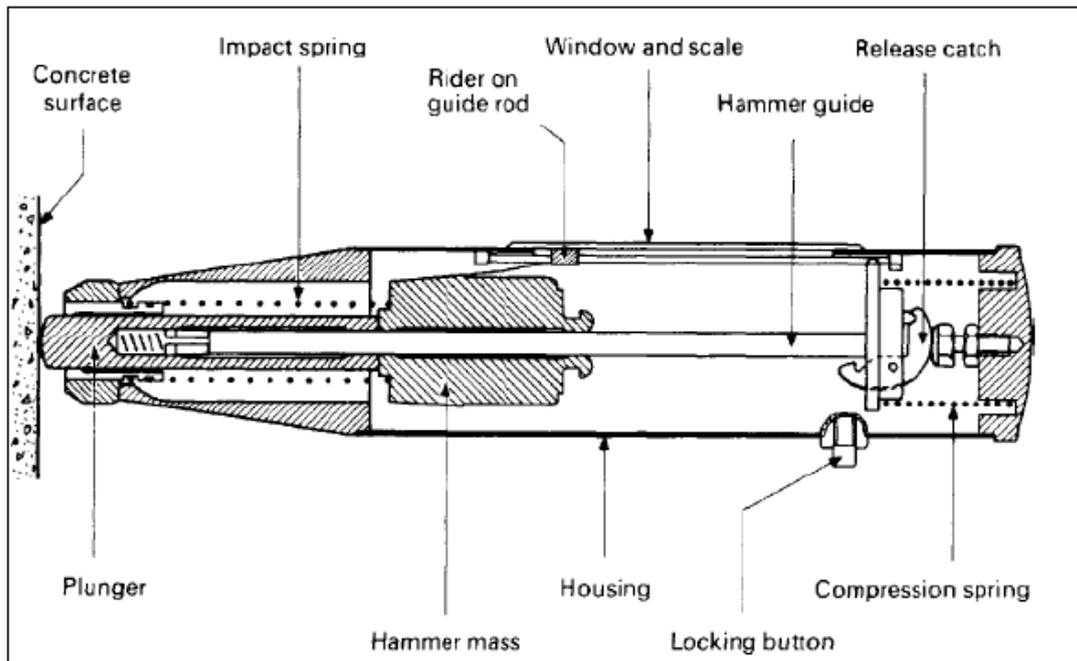


Fig. 2.2- Vue en coupe schématique du marteau de rebondissement de Schmidt type N [34].

2.5.3. Surface de l'essai

2.5.3.1. Choix de la surface

Les éléments de béton soumis à l'essai doivent avoir une épaisseur minimale de 100 mm et être encastrés dans une structure. Des corps d'épreuve de dimensions plus réduites peuvent être testés à condition qu'ils soient fermement maintenus. Il convient d'exclure les zones présentant des nids de cailloux, des écaillages, une texture grossière ou une porosité élevée.

Lors du choix de la surface d'essai, il convient de prendre en considération les facteurs suivants :

- la résistance du béton ;
- le type de surface ;
- le type de béton ;
- l'état d'humidité de la surface ;
- la carbonatation (le cas échéant) ;
- la direction d'essai ;
- les autres facteurs.

Une surface d'essai doit être d'environ 300 mm *300 mm.

2.5.3.2. Préparation

Poncer au moyen de la pierre à polir les surfaces de texture rugueuse ou peu résistantes ou couvertes de laitance se désagréant jusqu'à ce qu'elles soient lisses. Les surfaces brutes de coffrage ou lissées à la truelle peuvent être soumises à l'essai sans meulage préalable.

Toute trace d'humidité constatée à la surface du béton doit être éliminée.

2.5.4. Fonctionnement de l'appareil

Pour préparer l'instrument pour l'essai, libérer la tige de sa position verrouillée en poussant violemment la tige contre le béton, ce qui permet au corps de s'éloigner lentement du béton. Ceci fait sortir la tige du corps et le verrou attache la masse du marteau à la tige. La tige est alors maintenue perpendiculaire à la surface du béton et en poussant lentement le corps vers le béton. Ce mouvement va tendre le ressort qui tient la masse au corps. Quand le corps est poussé à la limite, le verrou est automatiquement libéré, et l'énergie stockée au ressort venant propulser la masse vers le bout de la tige et par là, la surface du béton. La tige de percussion réagit et retransmet le rebondissement à la masse (Fig. 2.3).

Lors du rebondissement, le curseur coulisse avec la masse et il s'arrête à la distance maximale où la masse atteint après le rebondissement. Un bouton du côté du corps est poussé pour fermer à clef la tige dans la position rétractée et l'indice de rebondissement est indiqué sur une échelle linéaire solidaire du bâti de l'instrument [20].

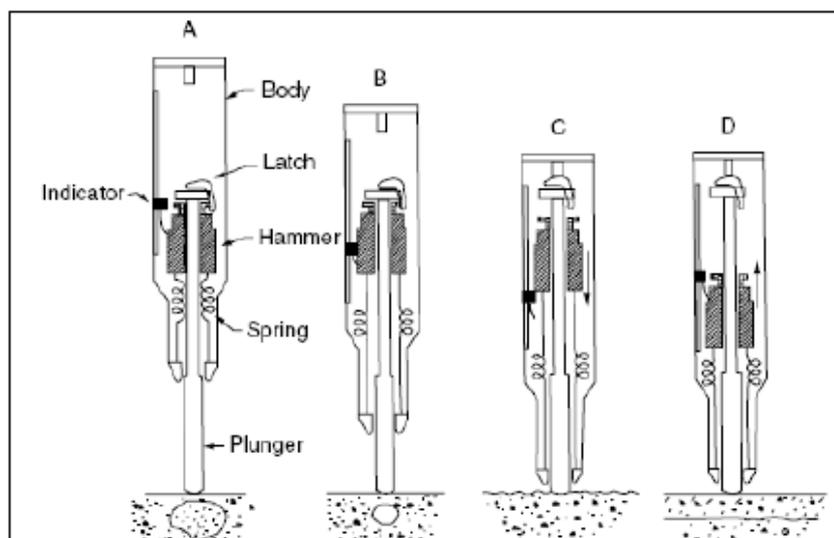


Fig. 2.3-Vue en coupe schématique du fonctionnement du marteau de rebondissement de Schmidt.

2.5.5. Modèles de corrélation entre la résistance et l'indice de rebondissement

L'évaluation de la résistance à la compression est habituellement basée sur des corrélations empiriques établies entre la résistance à la compression par écrasement et l'indice de rebondissement correspondant. Cependant, ce rapport reliant la résistance avec l'indice de rebondissement n'est pas unique, car il est affecté par beaucoup de facteurs, par exemple, type et dosage en granulats et en ciment, rapport E/C, et la teneur en humidité. Les fabricants fournissent généralement avec leurs appareils des courbes de corrélation établies suivant leurs propres systèmes d'essai, lesquels ne sont pas appropriées à tous les types de béton. Par conséquent, l'utilisateur doit développer sa propre corrélation qui est adaptée à sa situation. Ainsi, plusieurs modèles de corrélation ont été proposés par différents chercheurs comme le montre le Tableau 2.2.

Tableau 2.2-Corrélations proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression "R" (MPa) et l'indice de rebondissement "I" [2]

| Auteurs | Fonction de Régression | Plage de Résistance (Mpa) | Spécimen | Granulats | Réf |
|------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------|---|------|
| Gonçalves (1995) | $R = 1.73 I - 34.3$ | 18.0 à 42.0 | Carotte 70mm*70mm | / | [29] |
| Pascal et Al (2000) | $R = 0.000135I^{3.4424}$ | 30.0 à 150.0 | Cube 150mm | Calcaire $D_{max}=15mm$ | [29] |
| Qasrawi (2000) | $R = 1.353 I - 17.393$ | 6.0 à 42.0 | Cube 150mm | Variable | [29] |
| Lima et Silva (2000) | $R = 0.0501I^{1.8428}$ | 25.1 à 33.1 | Carotte 150mm*300mm | Gravier $D_{max}=25mm$ $D_{max}=40mm$ | [29] |
| K. Ali Benyahia (2010) | $R = 0.033 * I^{1.914}$ | 10 à 40 | Cube 100mm | / | [2] |

2.5.6. Avantages et limites d'essai du marteau de rebondissement

Le marteau de rebond développé par Schmidt fournit une méthode peu coûteuse et rapide pour les essais non destructifs du béton en laboratoire et sur le terrain.

Les limites du marteau Schmidt doivent être reconnues et prises en compte lors de son utilisation. On ne peut trop insister sur ce que le marteau ne doit pas être considéré comme un substitut à des essais de compression standard, mais plutôt comme une méthode pour déterminer l'homogénéité du béton dans les structures. L'estimation de la résistance du béton par le marteau

de rebond avec une précision de ± 15 à $\pm 20\%$ peut être possible que pour les spécimens moulés, durcis et testés dans des conditions similaires à celles d'où les courbes de corrélation sont établies [25].

2.5.7. Facteurs influençant la mesure de l'indice de rebondissement

Il existe plusieurs facteurs qui affectent la mesure de l'indice de rebondissement et par conséquent influent sur sa corrélation avec la résistance à la compression correspondante [20]. Ces facteurs sont les suivants :

- Lissage de la surface de test:

Le marteau doit être utilisé sur une surface lisse. Si la surface est rugueuse, par exemple une surface à la truelle, elle doit être poncée en douceur avec une pierre de carborundum (pierre à polir) [20].

- Taille, forme et rigidité de l'échantillon:

Si le béton ne fait pas partie d'une grande masse de tout mouvement provoqué par l'impact du marteau se traduira par une diminution du nombre de rebond. Dans de tels cas, le membre doit être rigoureusement tenu ou soutenue par une lourde masse [20].

- L'âge de l'échantillon

Le taux de gain de la dureté de surface du béton est rapide jusqu'à l'âge de 7 jours, après quoi il y a peu ou pas de gain de la dureté de surface, mais pour un béton correctement guéri, il y a un gain significatif au-delà de 7 jours. Il a été confirmé pour la même force, les valeurs de rebonds élevés sont obtenues sur un béton de 7 jours que sur un béton de 28 jours. Il est souligné que lorsque le vieux béton doit être testé, des corrélations directes sont nécessaires entre les numéros de rebonds pris sur la structure et la résistance à la compression de carottes prélevées à partir de la structure [25].

- Surface et les conditions d'humidité à l'intérieur du béton:

Le degré de saturation du béton et la présence de l'humidité de surface ont un effet déterminant sur l'évaluation du test de marteau de Schmidt. Il a été démontré que bien mûri, un spécimen séché à l'air, et lorsqu'il est trempé dans l'eau et testé l'état de surface sèche saturée, montre une lecture de rebond 5 points de moins que lors de l'essai à sec. Lorsque les mêmes échantillons ont été laissés dans une pièce à 70°F (21,1°C) et séché à l'air, ils ont récupéré 3 points 3 jours et 5 points en 7 jours. Il a été démontré aussi que pendant 3 ans de différences le béton récupère jusqu'à 10 à 12 points dans les numéros de rebond existant entre les échantillons stockés

à l'état humide et des échantillons en laboratoire sec. Cette différence dans le nombre de rebond représente environ 14MPa de différence de résistance à la compression [25].

Il est suggéré que, chaque fois que l'état réel du béton sur le terrain ou des spécimens n'est pas connu, il serait souhaitable de pré-saturer la surface quelques heures avant les essais et l'utilisation de la corrélation des tests sur des échantillons saturés [20].

- Type d'agrégats grossiers:

Même si le même type d'agrégat est utilisé dans le mélange de béton, les courbes de corrélation peuvent être différents si la source de l'agrégat est différent [20].

- Type de ciment:

Le type de béton affecte considérablement le nombre des lectures de rebond. Le béton de ciment high alumina peut avoir des lecture de rebonds 100% plus élevés que ceux obtenus en utilisant une courbe de corrélation basée sur le béton à base de ciment portland ordinaire. En outre, le béton de ciment super sulfaté peut avoir une résistance de 50% inférieur à celui obtenu à partir des courbes de corrélation ciment de béton Portland ordinaire [25].

- La carbonatation de la surface du béton:

Dans le béton plus la profondeur de carbonatation peut être de plusieurs millimètres d'épaisseur et, dans l'extrême cas, jusqu'à 20 mm d'épaisseur. Dans ces cas, les numéros de rebonds peuvent être jusqu'à plus de 50% que ceux obtenus sur une surface de béton non gazeuse [20].

2.5.8. Normalisation des méthodes de la dureté de surface

La méthode de rebondissement a gagné une acceptation considérable, et a été introduite dans plusieurs normes telles que ASTM, EN et ISO pour l'estimation de la résistance à la compression du béton.

La norme américaine ASTM C 805 « Méthode d'essai standard pour l'indice de rebondissement du béton durci » [33] a été publié pour la première fois en 1975 comme une méthode d'essai provisoire et adopté en 1979 comme méthode d'essai standard.

La norme européenne NF EN 12504-2 « Essais pour béton dans les structures – Partie 2 :Essais non destructifs –Détermination de l'indice de rebondissement »[10], spécifie une méthode permettant de déterminer l'indice de rebondissement d'une surface de béton durci à l'aide d'un marteau à ressort du type N qui a été développé à l'origine par la société Schmidt. Cette norme découle du projet de norme internationale ISO/DIS 8045, «Béton durci -Détermination de l'indice de rebondissement à l'aide du scléromètre», et fait référence à l'ASTMC 805 [11].

2.6. Ultrason (Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique)

2.6.1. Introduction

Les premiers rapports de mesure de la vitesse générée mécaniquement et l'impulsion à travers le béton sont apparus aux Etats-Unis au milieu des années 1940. Il a été constaté que la vitesse dépend essentiellement des propriétés élastiques du matériau était presque indépendant de la géométrie. La valeur potentielle de cette approche était évidente, mais des problèmes de mesure ont été considérables. Cette forme de tests a été développée dans la méthode par ultrasons modernes en employant des impulsions dans la gamme de fréquences de 20 à 150kHz, généré et enregistré par des moyens de circuits électroniques.

L'essai repose actuellement en grande partie sur la vitesse d'impulsion mesurée à l'aide des techniques de transmission sur le béton. Le procédé est devenu largement acceptée dans le monde, le produit est commercialement robuste et c'est du matériel léger approprié pour le site ainsi que l'utilisation en laboratoire, et est facilement disponible.

2.6.2. Théorie de la propagation de l'impulsion à travers le béton

Trois types de propagation des ondes mécaniques sont créés quand la surface d'un milieu solide élastique est soumise à une charge dynamique ou vibratoire:

- les ondes de compression (également appelées longitudinales ou ondes P);
- les ondes de cisaillement (transversales ou ondes S);
- les ondes de surface (les ondes de Rayleigh).

Les ondes de compression se propagent à travers le milieu solide d'une manière identique aux ondes sonores qui se propagent dans l'air. Chaque type d'onde se propage avec sa vitesse caractéristique qui dépend seulement des propriétés élastiques et de la densité du milieu comme le montre l'équation (2.1). Pour un solide donné les ondes de compression peuvent avoir la vitesse la plus élevée. Par contre, les ondes de surface ayant la vitesse la plus faible.

Dans le béton, les vitesses des ondes de cisaillement et de surface sont en général, respectivement de 60% et 55%, de celle des ondes de compression. Alors ces dernières sont les plus importantes puisqu'elles sont les plus rapides et fournissent généralement des informations plus utiles. Pour un milieu solide élastique et homogène, la vitesse des ondes de compression (ondes P) est donnée par l'équation (2.1). [2].

$$V = \sqrt{\frac{K * E}{\rho}} \dots\dots\dots \text{l'équation.(2.1)}$$

Où:

V : vitesse des ondes de compression;

$$K = \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

E: module dynamique d'élasticité;

ρ : Densité;

μ : Module dynamique de Poisson.

Pendant l'essai, le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton est enregistré et la vitesse va être calculée par l'équation (2.2)

$$V = \frac{L}{T} \dots\dots\dots \text{l'équation (2.2)}$$

Où:

V : la vitesse d'impulsion (m/s);

L : la longueur du parcours (m);

T : le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur (s).

2.6.3. Principe fondamental

Un train d'ondes longitudinales est produit par un transducteur électro-acoustique maintenu au contact d'une surface du béton soumis à l'essai. Après avoir parcouru une longueur connue dans le béton, le train de vibrations est converti en signal électrique par un deuxième transducteur, et des compteurs électroniques de mesure du temps permettent de mesurer le temps de parcours de l'impulsion. Avec ces deux données la vitesse est calculée puis selon cette dernière la qualité du béton sera déterminée comme représenté dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3- Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion [25]

| Vitesse de propagation des impulsions (m/s) | Qualité du béton |
|---|------------------|
| Supérieure à 4500 | Excellente |
| 3500 - 4500 | Bonne |
| 3000 - 3500 | Moyenne |
| Inférieure à 3000 | Douteuse |

2.6.4. Description de l'appareil

Le matériel se compose essentiellement d'un générateur électrique d'impulsions, une paire de transducteurs, un amplificateur et un dispositif de minutage électronique pour mesurer l'intervalle de temps entre le début d'une impulsion générée au niveau du transducteur d'émission et de son arrivée sur le transducteur récepteur. Deux formes de dispositif électronique de temporisation et d'affichage sont disponibles, dont l'un utilise un tube à rayons cathodiques sur lequel l'impulsion reçue est affichée par rapport à une échelle de temps appropriée, l'autre utilise une horloge d'intervalle d'un affichage numérique à lecture directe (Figure 2.4).

Le matériel doit avoir les caractéristiques suivantes. Il doit être capable de mesurer le temps de passage sur des longueurs de chemin allant d'environ 100 mm à l'épaisseur maximale à inspecter avec une précision de $\pm 1\%$. En général, les transducteurs utilisés devraient être de l'ordre de 20 à 150kHz, les fréquences aussi basses que 10kHz peuvent être utilisées pour des longueurs de chemin en béton très longues et aussi haut que 1 MHz pour les mortiers et les coulis ou pour des longueurs de trajets courts. Des impulsions à haute fréquence ont un début bien défini, mais, lors de leur passage à travers le béton, elles s'atténuent plus rapidement que les impulsions de basse fréquence. Il est donc préférable d'utiliser des transducteurs haute fréquence pour des longueurs de trajet courts et transducteurs basse fréquence pour les longueurs des trajets longs. Transducteurs avec une fréquence de 50 kHz à 60 kHz conviennent aux applications les plus courantes (Figure 2.5).

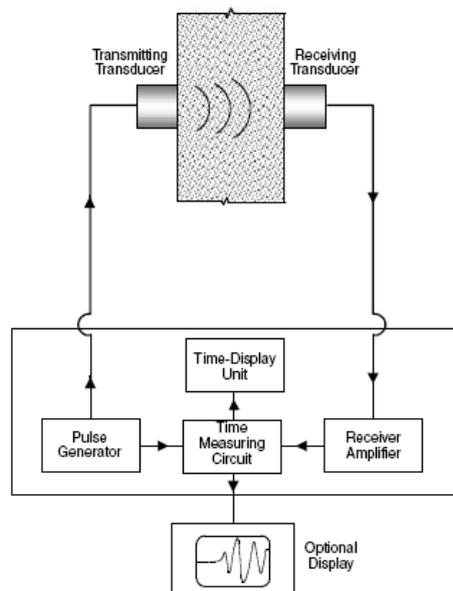


Fig. 2.4- Diagramme schématisé du circuit d'essai de vitesse de l'impulsion [13].



Fig. 2.5- Appareil de mesure de la vitesse d'impulsion [26].

2.6.5. Procédé de mesure

Le fonctionnement est relativement simple, mais nécessite beaucoup de soin si des résultats fiables doivent être obtenus. Un essentiel est bon couplage acoustique entre la surface du béton et de la face du transducteur test fourni par un milieu tel que de la vaseline, du savon liquide ou de la graisse. Les poches d'air doivent être éliminées, et il est important que seule une mince couche de séparation existe, tout excédent doit être évincé. Un moyen de lumière, tel que la vaseline ou de savon liquide, a été jugée meilleure pour les surfaces lisses, mais une graisse plus épaisse est recommandée pour les surfaces rugueuses qui n'ont pas été exprimées contre volets lisses.

Il est également important que les lectures soient répétées par l'élimination complète et la réutilisation des capteurs pour obtenir une valeur minimum pour le temps de transit. Bien que l'équipement de mesure est revendiqué comme précis à $\pm 0,1$ microsecondes, si une précision de temps de transit de $\pm 1\%$ doit être atteint, il peut être généralement nécessaire pour obtenir une lecture à $\pm 0,7$ microsecondessur une longueur de chemin 300mm. Cela ne peut être réalisé avec une attention particulière à la technique de mesure et de lectures douteuses doit être répété si nécessaire, avec une attention particulière à l'élimination de toute autre source de vibrations, même légère, au cours de l'essai.

La longueur du chemin doit aussi être mesurée avec une précision de $\pm 1\%$. Cela devrait poser peu de problèmes avec les chemins de plus de 500mm, mais pour les voies plus courtes, il est recommandé que les étriers soient utilisés [18].

Il y a trois façons de base dans lesquelles les transducteurs peuvent être organisés, comme le montre la (Figure 2.6). Ce sont:

- (a) les faces opposées (transmission directe);
- (b) les faces adjacentes (transmission semi directe);
- (c) la même face (transmission indirecte).

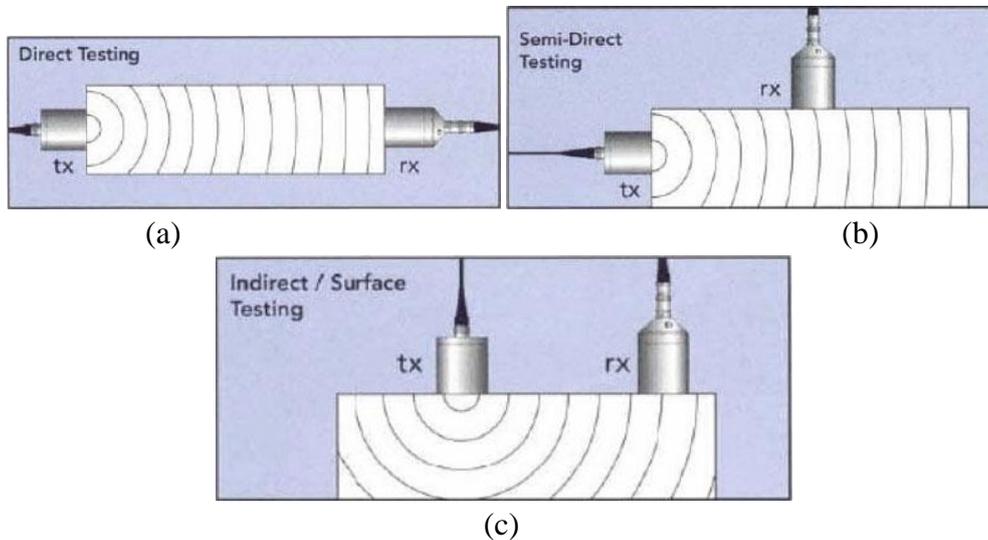


Fig. 2.6- Configurations des transducteurs pour la mesure de la vitesse ultrasonique

Etant donné que l'énergie d'impulsion maximale est transmise perpendiculairement à la face de l'émetteur, la méthode directe est la plus fiable du point de vue de la mesure du temps de transit. En outre, le chemin est clairement défini et peut être mesuré avec précision, et cette approche devrait être utilisée chaque fois que possible pour évaluer la qualité du béton. La méthode semi-directe peut parfois être utilisée de façon satisfaisante si l'angle entre les transducteurs n'est pas trop grand, et si la longueur du trajet n'est pas trop grande. La sensibilité sera plus petite, et si ces conditions ne sont pas remplies, il est possible qu'aucun signal clair ne sera reçu en raison de l'atténuation de l'impulsion émise. La longueur du trajet est également moins clairement définie en raison de la taille du transducteur, mais il est généralement considéré comme suffisant pour profiter de cette méthode de transmission directe [18].

La méthode indirecte est certainement la moins satisfaisante, puisque l'amplitude du signal reçu peut être inférieure à 3% de celle pour une transmission directe comparable. Le signal reçu est tributaire de la diffusion de l'impulsion par des discontinuités se test donc est fortement tachées d'erreurs. La vitesse d'impulsion sera principalement influencée par la zone de béton de surface, ce qui peut ne pas être représentatif du corps et la longueur exacte du chemin est

incertaine. Une procédure spéciale est nécessaire pour tenir compte de ce manque de précision de la longueur du trajet, nécessitant une série de lectures avec l'émetteur et le récepteur fixe situé à une série d'échelons fixes le long d'une ligne radiale choisie (Figure 2.7). Les résultats sont représentés graphiquement (Figure 2.8). La vitesse moyenne de l'impulsion est donnée par la pente de la meilleure droite. Sauf si des mesures sont prises pour détecter de telles caractéristiques, cette méthode doit être évitée autant que possible et seulement utilisée lorsque seulement une surface est disponible [18].

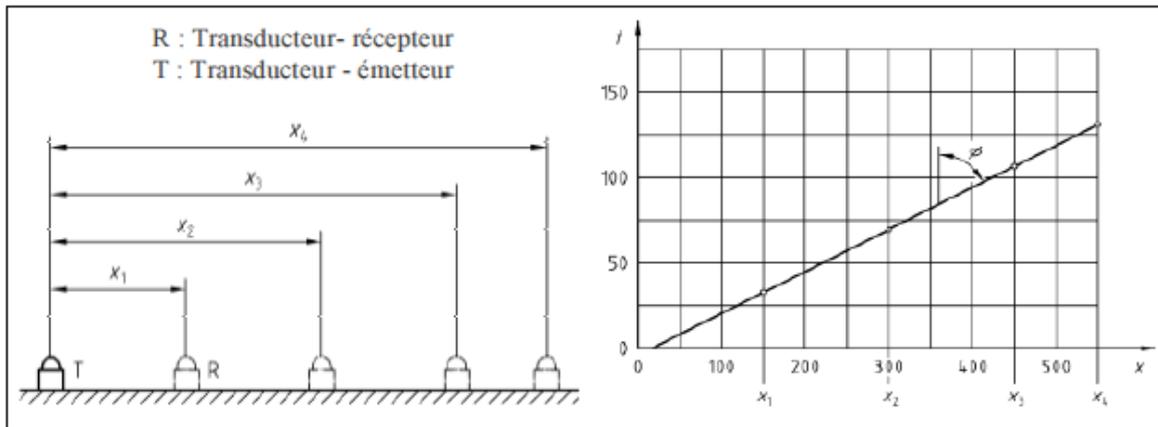


Fig. 2.7-Exemple de détermination de la vitesse de propagation du son par transmission indirecte (mesures en surface)

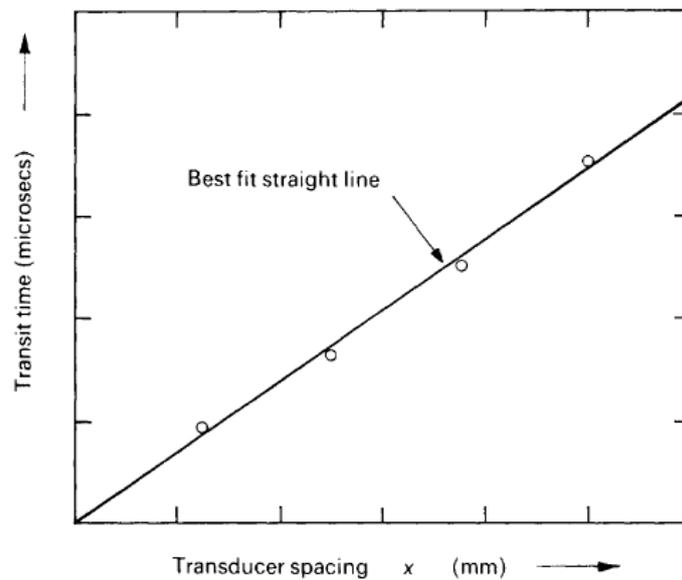


Fig.2.8- Résultat d'une lecture indirecte [2].

2.6.6. Applications

La méthode de la vitesse d'impulsion a été appliquée avec succès aussi bien en laboratoire que sur chantier. En outre, elle peut être employée pour le contrôle de la qualité et l'analyse de la détérioration du béton in situ. Ainsi, cette méthode peut être généralement utilisée pour les applications suivantes:

- estimation de la résistance du béton;
- établissement de l'homogénéité du béton;
- études de l'hydratation du ciment;
- études de la durabilité du béton;
- mesure de la profondeur des fissures de surface;
- détermination du module d'élasticité dynamique et coefficient de Poisson.

2.6.6.1. Estimation de la résistance du béton

La méthode de vitesse d'impulsion peut fournir un moyen pour estimer la résistance du béton in situ et du béton préfabriqué bien qu'il n'y ait aucune relation physique entre la résistance et la vitesse. La résistance peut être estimée à partir de la vitesse d'impulsion par une corrélation graphique préétablie entre les deux paramètres (Fig. 2.8.bis).

Le rapport entre la résistance et la vitesse d'impulsion n'est pas unique, et est affecté par plusieurs facteurs, par exemple la taille des granulats, le type et le dosage en ciment, le rapport E/C et la teneur en humidité. L'effet de chaque facteur a été étudié par plusieurs chercheurs. Ils ont clairement précisé qu'aucune tentative ne devrait être faite pour estimer la résistance à la compression du béton à partir de la vitesse d'impulsion à moins que des corrélations semblables aient été précédemment établies pour le type de béton à l'étude [26].

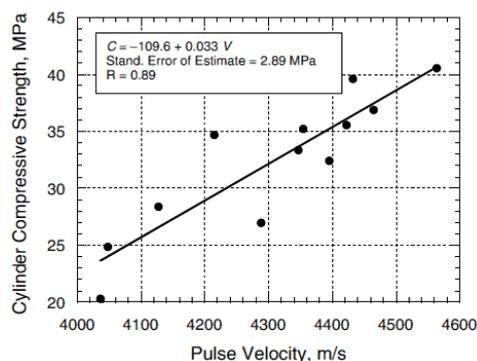


Fig.2.8.bis- Exemple de corrélation entre la Vitesse d'impulsion et la résistance à la compression d'éprouvettes cylindriques [26].

2.6.7. Facteurs affectant la vitesse d'impulsion ultrasonique

Il existe de nombreux facteurs liés à des mesures effectuées sur le béton in situ qui peuvent influencer davantage les résultats. Parmi ces facteurs il y a :

2.6.7.1 Taille des agrégats, terrassement, Type et contenu

De nombreux chercheurs ont constaté que la vitesse d'impulsion est affectée de façon significative par le type et la quantité des agrégats. En général, la vitesse d'impulsion de la pâte de ciment est inférieure à celle de l'agrégat. D'autre part, le type d'agrégat n'a pas d'effet significatif sur la relation entre la vitesse de l'impulsion et le module de rupture [25].

2.6.7.2 Type de Ciment

Il a été rapporté que le type de ciment n'a pas eu d'effet significatif sur la vitesse d'impulsion. Le taux d'hydratation, cependant, est différent pour différents ciments et il aura une influence sur la vitesse d'impulsion. Comme le degré d'hydratation augmente, le module d'élasticité augmente et la vitesse de l'impulsion va également augmenter [25].

2.6.7.3 Rapport Eau-Ciment

Kaplan a étudié l'effet du rapport E/C sur la vitesse d'impulsion. Il a montré que quand ce rapport augmente, les résistances à la compression et à la flexion et la vitesse d'impulsion correspondant diminuent en supposant qu'il n'y est aucun autre changement dans la composition du béton [25].

2.6.7.4 Utilisation des Adjuvants

Vu la grande diversité des adjuvants utilisés pour la préparation du béton, le problème de leur influence sur la corrélation vitesse - résistance est très complexe. Alors, l'entraîneur d'air ne semble pas influencer la corrélation. Par contre, d'autres adjuvants influencent la vitesse d'impulsion, approximativement de la même façon qu'ils influenceraient la vitesse d'hydratation. Par exemple, l'addition du chlorure de calcium réduira le temps de prise du béton et augmentera la vitesse d'hydratation par lequel la vitesse d'impulsion augmente [25].

2.6.7.5 Age du béton

L'effet de l'âge du béton sur la vitesse d'impulsion est similaire à l'effet du développement de la résistance du béton. Jones a montré que la vitesse augmente très rapidement au début, mais après elle s'aplatit. Cette tendance est similaire à la courbe de la force par rapport à l'âge d'un

type particulier de béton, mais la vitesse d'impulsion atteint une valeur limite plus tôt que la force. Il a en outre conclu que, une fois la courbe de vitesse d'impulsion s'aplatit, l'erreur expérimentale, rend impossible d'estimer la force avec précision [25].

2.6.7.6 Contact des transducteurs

Si une attention suffisante n'est pas exercée à obtenir un bon contact (par exemple, la pression incompatible appliqué aux transducteurs), une lecture de la vitesse d'impulsion incorrecte peut être provoquée [25].

2.6.7.7 Température du béton

Les variations de température entre 5 et 30°C ont un effet négligeable sur la vitesse d'impulsion. Pour des températures au-delà de cette gamme, les valeurs d'impulsion peuvent être corrigées grâce à des coefficients de correction [25].

2.6.7.8 L'humidité et Condition de durcissement du béton

La vitesse d'impulsions pour un béton saturé est supérieur à celui pour le béton sécher à l'air. L'humidité a en général moins d'influence sur la vitesse de béton à haute résistance que le béton de faible résistance en raison de la différence dans la porosité. [25].

2.6.7.9 Longueur de parcours

Théoriquement, la longueur de parcours traversée par l'onde ne devrait pas affecter le temps de propagation. Alors, la vitesse de propagation de l'impulsion n'est généralement pas influencée par les variations de longueur de parcours, bien que l'appareil électronique de mesure de temps soit susceptible de fournir des indications selon lesquelles la vitesse tend légèrement à décroître lorsque la longueur de parcours augmente. Ceci provient du fait que les composants de l'impulsion à plus haute fréquence sont davantage atténués que les composants à plus basse fréquence [25].

Il convient que la longueur de parcours sur laquelle est mesurée la vitesse de propagation du son soit suffisante pour éviter toute influence significative de la nature hétérogène du béton sur la mesure. Le règlement recommande les longueurs minimales suivantes du parcours:

- 10 cm pour béton ayant la taille maximum des granulats de 30 mm,
- 15 cm pour béton ayant la taille maximum des granulats de 45 mm.

2.6.7.10 Taille et forme des spécimens

La vitesse d'impulsion est indépendante de la taille et de la forme du spécimen quelle traverse, à moins que sa faible dimension latérale soit inférieure que certaines valeurs minimums. Au-dessous de ces valeurs, la vitesse d'impulsion peut être réduite sensiblement. L'ampleur de cette réduction dépend principalement du rapport de la longueur d'onde des vibrations d'impulsions sur la faible dimension latérale du spécimen.

Le Tableau 2.4 indique la relation entre la vitesse d'impulsion dans le béton, la fréquence du capteur et la dimension latérale minimum permise du spécimen. Si le minimum de la dimension latérale est inférieur que la longueur d'onde ou si la méthode indirect de transmission est utilisé, le mode de propagation change, et par conséquent la vitesse mesurée sera différente [25].

Tableau 2.4-Effet de dimension du spécimen sur la transmission de l'impulsion [12].

| Fréquence du capteur (kHz) | Vitesse d'impulsion dans le béton (km/s) | | |
|----------------------------|---|-----------------------|-----------------------|
| | V _c = 3.50 | V _c = 4.00 | V _c = 4.50 |
| | Dimension latérale minimum permise du spécimen (mm) | | |
| 24 | 146 | 167 | 188 |
| 54 | 65 | 74 | 83 |
| 82 | 43 | 49 | 55 |
| 150 | 23 | 27 | 30 |

2.6.7.11 Efforts appliqués

La vitesse d'impulsion n'est pas généralement affectée par les efforts dans l'élément soumis à l'essai. Cependant, quand le béton est soumis à un niveau très élevé de charge statique ou cyclique par exemple 65% de la résistance ultime ou plus grands, des microfissures se développent dans le béton, qui réduira considérablement la vitesse d'impulsion [25].

2.6.7.12 Présence des armatures

Un des facteurs les plus importants qui influencent la vitesse d'impulsion de béton est la présence d'une armature en acier. La vitesse d'impulsion en acier est 1,4 à 1,7 fois la vitesse d'impulsion dans le béton ordinaire. Par conséquent, les lectures de vitesse d'impulsion dans le voisinage de l'acier d'armature sont généralement plus élevées que celle du béton ordinaire. Si des renforts croiser le chemin d'onde, les facteurs de correction doivent être utilisés, ces facteurs sont définie par le règlement [25].

2.6.8. Modèles de corrélation entre la résistance et la vitesse ultrasonique

L'évaluation de la résistance à la compression du béton in situ est habituellement basée sur des corrélations empiriques établies entre la résistance à la compression par écrasement et la vitesse ultrasonique correspondante. Aujourd'hui, il est unanimement admis que la résistance à la compression du béton croît en même temps que la vitesse ultrasonique avec une relation non linéaire c.à.d qu'aux grandes vitesses, les résistances augmentent plus vite qu'aux faibles vitesses. Les expressions analytiques les plus utilisées reliant la résistance à la compression "R" avec la vitesse ultrasonique "V" sont les suivantes :

- Relation de forme polynomiale: $R = a V^2 + b V + c$,
- Relation de forme puissance: $R = a V^b$,
- Relation de forme exponentielle: $R = a * e^{b * V}$.

Cependant, l'utilisateur doit développer son propre modèle de corrélation qui est adapté à sa situation, car la précision est la façon dont sont déterminées les constantes expérimentales a, b, et c qui sont affectées par beaucoup de facteurs, par exemple: type et dosage en granulats et en ciment, rapport E/C et les conditions de conservation du béton à examiner [28]. Plusieurs modèles de corrélation ont été proposés dans ce sens par différents chercheurs comme le montre le (Tableau 2.5).

Tableau 2.5- Corrélation proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression R (Mpa) et la vitesse ultrasonique (km/s) [2]

| Auteurs | Fonction de Régression | Plage de Résistance (Mpa) | Spécimen | Granulats | Réf |
|------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------|---|------|
| Gonçalves (1995) | $R = 0.02 V - 65.4$ | 18.0 à 42.0 | Carotte 70mm*70mm | / | [29] |
| Pascal et Al (2000) | $R = 10^{-28} V^{8.1272}$ | 30.0 à 150.0 | Cube 150mm | Calcaire D _{max} =15mm | [29] |
| Qasrawi (2000) | $R = 36.72 V - 129.077$ | 6.0 à 42.0 | Cube 150mm | Variable | [29] |
| Yun et Al (1988) | $R = 0.329 V - 1065$ | 5.0 à 30.0 | Carotte 150mm*300mm | Gravier D _{max} =25mm D _{max} =40mm | [29] |
| K. Ali Benyahia (2010) | $R = 0.899 \exp(0.844 * V)$ | 15 à 45 | Cube 100mm | / | [2] |

2.6.9. Limites et avantages de l'essai vitesse d'impulsion ultrasonique

La méthode de la vitesse d'impulsion est un excellent moyen pour étudier l'homogénéité du béton. La procédure de test est simple et le matériel disponible sur le marché est facile à utiliser en laboratoire ainsi que dans le domaine.

Les procédures de test ont été normalisées par l'ASTM et d'autres organisations, et l'équipement d'essai est disponible à partir de plusieurs sources commerciales. Avec la disponibilité de petits instruments numériques portables, qui sont relativement peu coûteux et facile à utiliser, le contrôle par ultrason s'ajoute une nouvelle dimension au contrôle de la qualité du béton sur le terrain.

Dans la mesure où un grand nombre de variables influent sur les relations entre les paramètres de résistance du béton et sa vitesse d'impulsion, l'utilisation de celui-ci pour estimer la compression et / ou de résistance à la flexion du béton n'est pas recommandée à moins que des tests de corrélation ait été effectués précédemment.

2.7. Méthode combinée des essais non destructifs

Les variations dans les propriétés du béton ont une incidence sur les résultats des tests (en particulier dans des directions opposées), l'utilisation d'une seule méthode ne serait pas suffisante pour étudier et évaluer les propriétés requises. Par conséquent, l'utilisation de plus d'une méthode donne des résultats plus fiables. Par exemple, l'augmentation de la teneur en humidité du béton augmente la vitesse de l'impulsion ultrasonique, mais réduit l'indice de rebondissement. Ainsi, en utilisant les deux méthodes ensemble permettra de réduire les erreurs produites en utilisant une seule méthode pour évaluer le béton [24].

En outre, les résultats obtenus par la méthode combinée (scléromètre - ultrason) lors de la corrélation avec la résistance à la compression donnent généralement un coefficient de corrélation plus élevé et une erreur type moins élevée comparativement aux méthodes uni-paramétriques [28] [34].

Plusieurs chercheurs ont proposés différents modèles de corrélation par la méthode combinée sous forme graphique et sous forme d'équations reliant les mesures des essais non destructifs (indice de rebondissement et vitesse ultrasonique) avec la résistance à la compression par écrasement.

Tableau 2.6- Corrélation proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression R (Mpa) et la vitesse ultrasonique (km/s) et la résistance (Rc)

| Auteurs | Fonctions de régression | Coefficient de corrélation | | | Ref |
|------------------------|--|----------------------------|-------|-------|------|
| | | (V) | (I) | (V,I) | |
| Soshiroda et al (2006) | $R_{28} = 10.222 V_3 + 1.498 I_3 - 33.261$ | 0.908 | 0.962 | 0.972 | [35] |
| | $R_{28} = 8.630 V_{28} + 1.416 I_{28} - 51.581$ | 0.900 | 0.965 | 0.967 | |
| Hobbs et Kebir (2007) | $R = - 4.069 V^2 + 57.693 V + 1.307 I - 173.033$ | 0.903 | 0.925 | 0.949 | [30] |
| Idrissou (2006) | $R = 0.00745 V^{3.27} * I^{0.97}$ | 0.91 | 0.86 | 0.95 | [26] |
| | $R = 0.06 V^4 + 1.05 * I - 28.26$ | 0.96 | 0.86 | 0.95 | |
| Ait Mohand (1995) | $R = 8.700 * V + 0.312 * I - 20.940$ | 0.87 | 0.83 | 0.88 | [36] |
| Kenai et Bahar (2003) | $R = 11.000 * V + 0.390 * I - 26.200$ | / | / | / | [37] |

Voici un exemple de corrélation développée entre l'indice de rebondissement, la vitesse ultrasonique et la résistance à l'écrasement sur des éprouvettes cubique de 150mm [38].

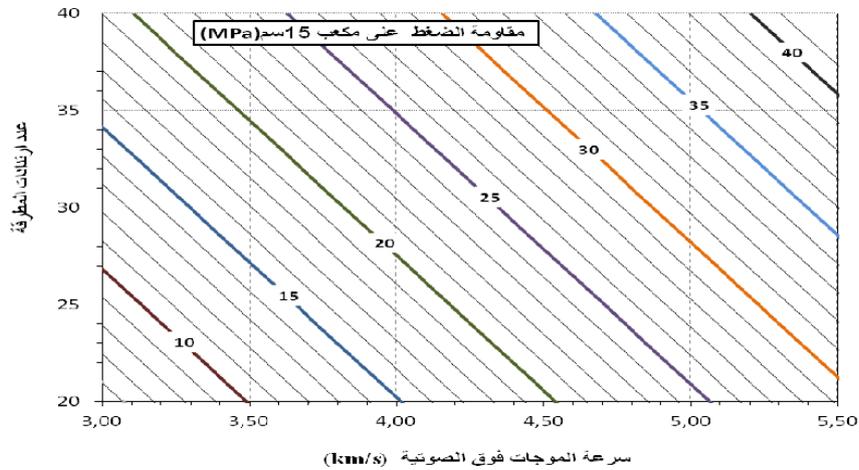


Fig.2.9- Exemple de corrélation par la méthode combinée

2.8. Conclusion

Pour un usage satisfaisant des essais non destructifs, il est nécessaire de connaître les facteurs influençant les mesures obtenues, et la méthode adéquate pour l'élaboration d'une corrélation qui est adaptée à sa situation entre la résistance à la compression et les mesures non destructives.

Deux méthodes d'essais non destructifs du béton sont essentiellement ciblées par ce travail, essais par Scléromètre et par Ultrason. Ces deux méthodes ont été employées pour évaluer la résistance du béton en utilisant des courbes de corrélation entre les mesures des essais non destructifs et la résistance à la compression par écrasement du béton.

L'utilisation d'une seule méthode des essais non destructifs ne présente pas toujours une précision suffisante pour estimer la résistance à la compression du béton, mais l'utilisation de méthodes combinées donnera des résultats plus fiables et plus précis.

Liste des Figures

| | | |
|------------------------|---|----|
| Figure.2.1 | Marteau de rebondissement de Schmidt de type N en cours d'utilisation..... | 18 |
| Figure.2.2 | Vue en coupe schématique du marteau de rebondissement de Schmidt type N..... | 19 |
| Figure.2.3 | Vue en coupe schématique du fonctionnement du marteau de rebondissement de Schmidt..... | 20 |
| Figure.2.4 | Diagramme schématique du circuit d'essai de vitesse de l'impulsion..... | 26 |
| Figure.2.5 | Appareil de mesure de la vitesse d'impulsion..... | 27 |
| Figure.2.6 | Configurations des transducteurs pour la mesure de la vitesse ultrasonique..... | 28 |
| Figure.2.7 | Exemple de détermination de la vitesse de propagation du son par transmission indirecte (mesures en surface)..... | 29 |
| Figure.2.8 | Résultat d'une lecture indirecte..... | 29 |
| Figure.2.8.bis | Exemple de corrélation entre la Vitesse d'impulsion et la résistance à la compression d'éprouvettes cylindriques..... | 30 |
| Figure.2.9 | Exemple de corrélation par la méthode combinée..... | 36 |
| Figure.3.1 | Sections des Eléments de la structure..... | 38 |
| Figure.3.2 | Différents Désordres Constatés sur la..... | 39 |
| Figure.3.3 | Scléromètre utilisé..... | 40 |
| Figure.3.4 | Ultrason utilisé..... | 40 |
| Figure. 3.5 | Carotteuse utilisé..... | 40 |
| Figure. 3.5.bis | Presse..... | 40 |
| Figure.3.6 | Schéma représentatif des différentes zones d'essais..... | 41 |
| Figure.3.6-(a) | Exemple d'essais Sclérométrique..... | 41 |
| Figure.3.6-(b) | Exemple d'essais Ultrasonique..... | 41 |
| Figure.3.7 | Etalonnage de l'appareil..... | 42 |

| | | |
|------------------------|---|-------|
| Figure.3.8-(a) | Mesure Sclérometrique sur Poteau..... | 42 |
| Figure.3.8-(b) | Mesure Sclérometrique sur Poutre..... | 42 |
| Figure.3.9 | Etalonnage de l'ultrason..... | 43 |
| Figure.3.10-(a) | Mesure Ultrasonique sur Poteau..... | 43 |
| Figure.3.10-(b) | Mesure Ultrasonique sur un Poteau..... | 43 |
| Figure.3.11 | Exemples d'opérations de Carottage sur Poteau..... | 44 |
| Figure.3.12 | Les points de Carottage sélectionné pour chaque Poteau..... | 45-46 |
| Figure.3.13 | Mesure de la Pénétration du CO ₂ dans le béton..... | 47 |
| Figure. 3.14 | Découpage de Carotte..... | 47 |
| Figure.3.15 | Mesure Ultrasonique sur Carotte..... | 47 |
| Figure.3.16 | Mesure du Diamètre moyen..... | 48 |
| Figure.3.17 | Carottes Surfaccées..... | 48 |
| Figure.3.18 | Moule de Surfaçage | 48 |
| Figure.3.19 | Exemple d'essais D'écrasement sur Carotte..... | 49 |
| Figure.3.20 | Courbe de Tendance des Coefficients de Correction de la norme Américaine..... | 50 |
| Figure.3.21 | Morceaux de Carottes dans des Etuves pour Séchage..... | 51 |
| Figure.3.22 | Morceaux de Carottes dans un Bassin d'eau..... | 51 |
| Figure.4.1 | Corrélation Développée sur Tout les Eléments..... | 63 |
| Figure.4.2 | Corrélations Développées Par Blocs..... | 64 |
| Figure.4.3 | Corrélations Développées pour Eléments et Carottes..... | 65 |
| Figure.4.4 | Corrélations Développées pour Poteaux et Poutres..... | 66 |
| Figure.4.5 | Corrélations Développées par Bloc (Poteaux) | 67 |
| Figure.4.6 | Corrélations Développées par Niveau du Bloc A (Poteaux)..... | 68 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Figure.4.7 | Corrélations Développées par Niveau du Bloc B (Poteaux)..... | 69 |
| Figure.4.8 | Corrélations Développées pour Poteaux et Carottes..... | 70 |
| Figure.4.9 | Corrélations Développées par Bloc (Poutres)..... | 71 |
| Figure.4.10 | Corrélations Développées par Niveau du Bloc A (Poutres)..... | 72 |
| Figure.4.11 | Corrélations Développées par Niveau du Bloc B (Poutres)..... | 73 |
| Figure.4.12 | Corrélations Développées pour les Poutres et les Carottes correspondantes..... | 74 |
| Figure.4.13 | Comparaison des corrélations obtenue avec celle des fabricants et des autres chercheurs.... | 76 |
| Figure.4.14 | Corrélation Développée sur Tout les Eléments..... | 77 |
| Figure.4.15 | Corrélations Développées Par Blocs..... | 78 |
| Figure.4.16 | Corrélations Développées pour Eléments et Carottes..... | 79 |
| Figure.4.17 | Corrélations Développées pour Poteaux et Poutres..... | 80 |
| Figure.4.18 | Corrélations Développées par Bloc (Poteaux) | 81 |
| Figure.4.19 | Corrélations Développées par Niveau du Bloc A (Poteaux) | 82 |
| Figure.4.20 | Corrélations Développées par Niveau du Bloc B (Poteaux) | 83 |
| Figure.4.21 | Corrélations Développées pour Poteaux et Carottes | 84 |
| Figure.4.22 | Corrélations Développées par Bloc (Poutres) | 85 |
| Figure.4.23 | Corrélations Développées par Niveau du Bloc A (Poutres) | 86 |
| Figure.4.24 | Corrélations Développées par Niveau du Bloc B (Poutres) | 87 |
| Figure.4.25 | Corrélations Développées pour Poutres et Carottes | 88 |
| Figure.4.26 | Comparaison des corrélations obtenus avec celles des fabricants et celles d'autres chercheurs..... | 90 |
| Figure.4.27 | Courbe Développée pour toutes les carottes | 91 |
| Figure.4.28 | Courbes Développées pour les blocs | 92 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Figure.4.29 | Courbe de Corrélation Combinée entre résistance par écrasement des carottes et mesures non destructives sur éléments d'ouvrage..... | 93 |
|--------------------|---|----|

Liste des Tableaux

| | | |
|---------------------|---|----|
| Tableau .1.1 | Essais de résistance effectués sur éprouvettes de 1988 à 1993..... | 12 |
| Tableau .1.2 | influence du Transports sur la résistance du béton..... | 13 |
| Tableau .1.3 | Influence des Moyens de fabrication..... | 13 |
| Tableau .2.1 | Différents modèles de scléromètre..... | 18 |
| Tableau.2.2 | Corrélations proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression "R" (MPa) et l'indice de rebondissement "I"..... | 21 |
| Tableau.2.3 | Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion..... | 25 |
| Tableau.2.4 | Effet de dimension du spécimen sur la transmission de l'impulsion..... | 33 |
| Tableau.2.5 | Corrélation proposées par différents auteurs entre la résistance a la compression "R" (Mpa) et la vitesse ultrasonique "V" (km/s)..... | 35 |
| Tableau 2.6 | Corrélation proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression R (Mpa) et la vitesse ultrasonique (km/s) et la résistance (Rc)..... | 36 |
| Tableau 3.1 | Coefficients de Correction pour les Elancements de Carotte..... | 48 |
| Tableau.4.1- | Résultats obtenue des Essais par Scléromètre, Ultrason et Ecrasement des Carottes..... | 53 |
| Tableau 4.2- | Résultats de l'étude statistique sur les données obtenue par Scléromètre..... | 57 |
| Tableau 4.3- | Résultats de l'étude statistique sur les données obtenue par Ultrason..... | 59 |
| Tableau 4.4- | Résultats de l'étude statistique sur les données obtenue par Ecrasement des Carottes..... | 61 |

Chapitre 3

Etude Expérimentale

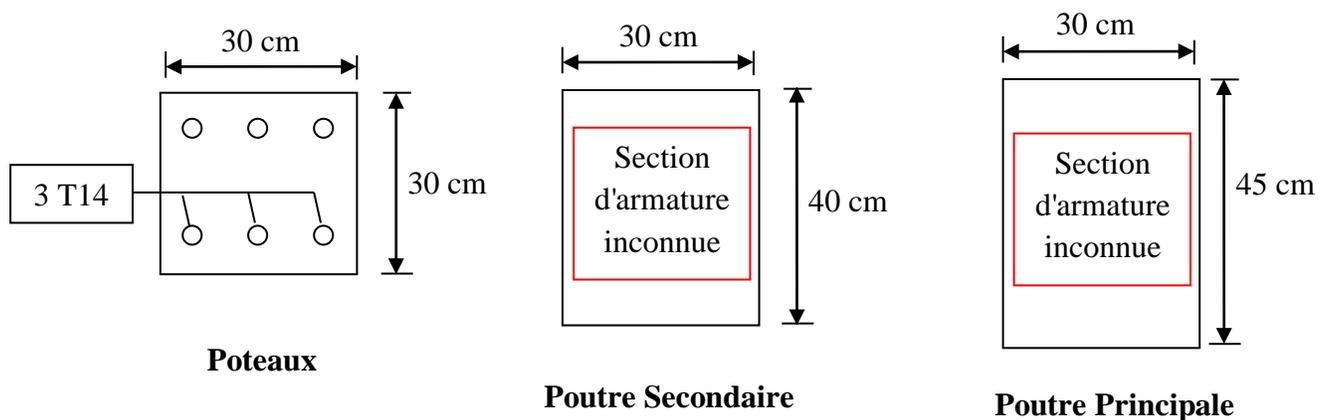
3.1. Introduction

Ce chapitre présente les différents essais destructifs et non destructifs effectués sur les différents éléments structuraux d'un bâtiment et sur les carottes prélevés sur une période de 3 mois.

3.2. Présentation de l'ouvrage

Le cas d'étude objet de cette recherche est un ouvrage à usage de bureaux, situé dans une zone industrielle de la région de Blida. Cette construction est constituée de deux blocs jointoyés de R+2et R+1 en béton armé, dépourvue de maçonneries et s'étendent sur une surface de 856 m². Le premier bloc à une cage d'escalier allant du RDC à la terrasse du 2^{ème} étage et le deuxième bloc lui présente 2 cages d'escaliers allant du RDC au premier Les dimensions des poteaux et poutres sont données dans la figure 3.1. Des vues en plans des différents étages sont données en annexe I.

Fig.3.1- Sections des Eléments de la structure



La structure fait état de plusieurs désordres constatés visuellement au cours de nos investigations (Figure 3.2).

- Epaufrures.
- Mauvaise utilisation du coffrage.
- Ségrégations multiples.
- Fissures continue au niveau des poutres.
- Eclatement de la surface du béton.
- Armatures Apparentes sur différent éléments poteaux et poutres.
- Corrosion des Armatures sur toute la structure.



Fissures Continues



Armatures Visibles



Epaufures



Ségrégations



Corrosion des armatures et Eclatement du béton

Fig.3.2-Différents Désordres Constatés sur la structure

3.3. Etude sur Site

3.3.1. Matériel utilisé

Les essais non destructifs ont été effectués à l'aide des appareils suivants:

- Un scléromètre de type N et de modèle C 181 (Fig. 3.3).
- Un ultrason de type E 46 avec des transducteurs de 50 mm de diamètre et de 54 kHz de fréquence (Fig. 3.4).
- Une carotteuse (Fig. 3.5).
- Une solution de Phénophtaléine.



Fig.3.3- Scléromètre utilisé.



Fig.3.4- Ultrason utilisé.



Fig.3.5.bis- Presse



Fig. 3.5- Carotteuse utilisé.

3.3.2. Déroulement des essais

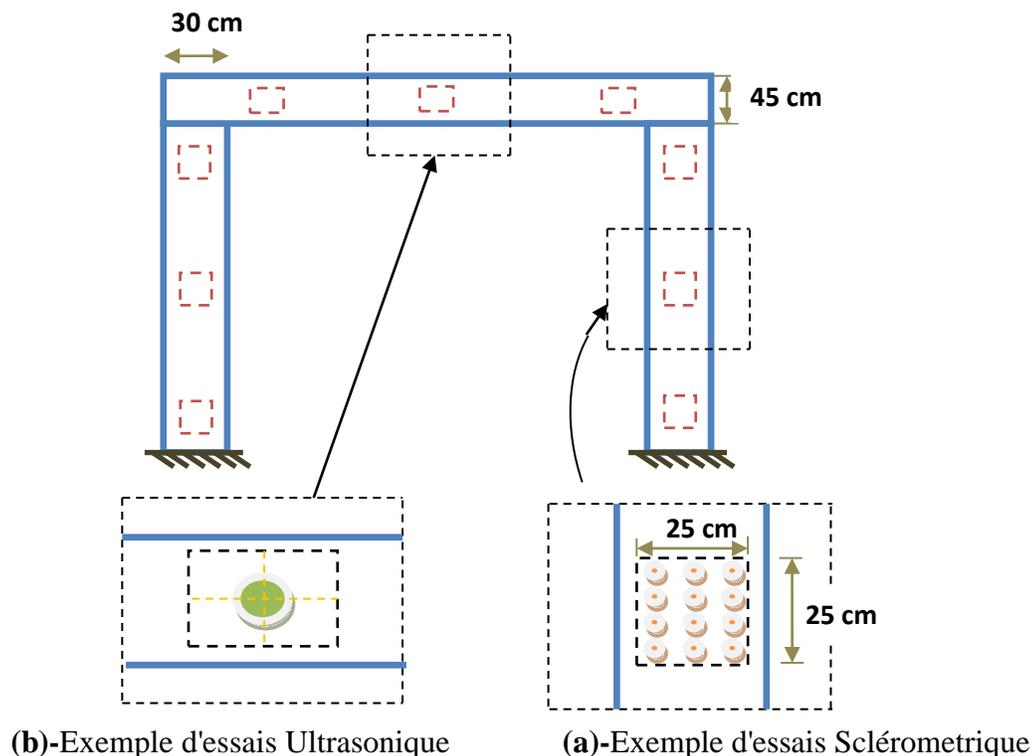
L'étude sur chantier a été réalisée sur une période de 3 mois (du mois de Décembre au mois de Février).

Dans un premier temps l'essai Sclérométrique et Ultrasonique ont été effectués sur trois endroits différents sur les éléments structuraux (poteaux et poutres) du bâtiment. Puis dans un deuxième temps, le prélèvement du béton variant de 2 à 3 échantillons, a été effectué sur ces mêmes endroits de ces éléments à l'aide d'une carotteuse. Enfin après prélèvement, l'essai de Carbonatation a été effectué sur les Carottes à l'aide d'une solution de Phénophtaléine puis conservés dans des glacières et transportés au laboratoire pour écrasement.

3.3.3. Procédure d'essais

Pour les essais non destructifs trois mesures ont été effectuées sur les différents éléments de la structure poteaux et poutres (Fig. 3.6). Au début de chaque essai nous avons pris le soin de poncer les surfaces des zones choisies à l'aide d'une pierre abrasive afin de les préparer aux mesures sclérométriques et ultrasoniques.

Fig.3.6-Schéma représentatif des différentes zones d'essais



Avant la réalisation des essais au scléromètre, il a été pris soin vérifié le bon fonctionnement de l'appareil à l'aide d'une enclume de calibrage (Fig. 3.7). Puis, en positionnant l'appareil de façon horizontale et perpendiculaire à la surface d'essais, on a effectué douze mesures dans une zone de 25*25 cm avec 2 à 3 cm d'espace entre chaque point (Fig. 3.6-a, 3.8). Enfin, Le résultat d'essai au scléromètre correspondant à chaque élément est la valeur médiane de l'ensemble des lectures effectuées sur les trois zones (**Annexe "III"**).



Fig.3.7- Etalonnage de l'appareil



Fig.3.8-(a)Mesure Sclérometrique sur Poteau



Fig.3.8-(b) Mesure Sclérometrique sur Poutre

Pour l'essai par ultrason, on s'est d'abord s'assurer du bon fonctionnement de l'appareil par son étalonnage en utilisant un barreau de calibrage (Fig. 3.9), puis sur chaque élément les mesures ont été effectuées selon la méthode par transmission directe au centre des surfaces d'essais tout en interposant une mince couche de graisse entre les deux transducteurs et l'élément (Figure:3.6-b, 3.10). Les valeurs des mesures sont données dans l'**Annexe "IV"**.



Fig.3.9-Etalonnage de l'ultrason



Fig.3.10-(a) Mesure Ultrasonique sur un Poteau



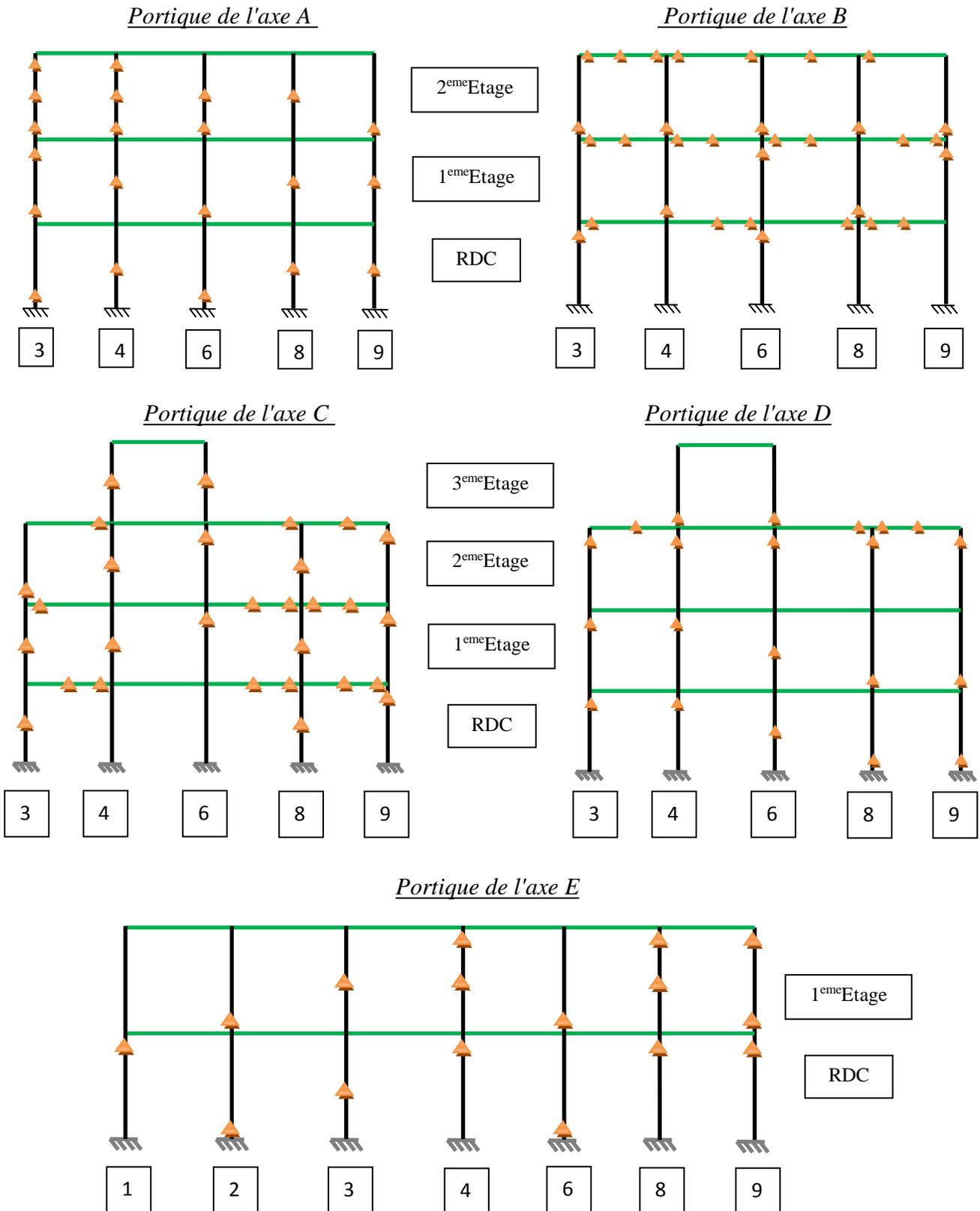
Fig.3.10-(b) Mesure Ultrasonique sur un Poteau

Nous avons procédé à des carottages (Figs. 3.11 et 3.12). Plus de détails sont donnés en **Annexe "II"**. Puis, de façon horizontale et perpendiculaire à la surface d'essais nous avons fixé la carotteuse muni d'un cylindre de 75 mm de diamètre à l'aide de chevilles ensuite après extraction, les carottes ont été essuyées et débarrassées de tout résidus de ciment et enfin marqué à l'aide d'un feutre indélébile pour préciser le nom de l'élément, l'étage, l'orientation et la zone d'extraction.

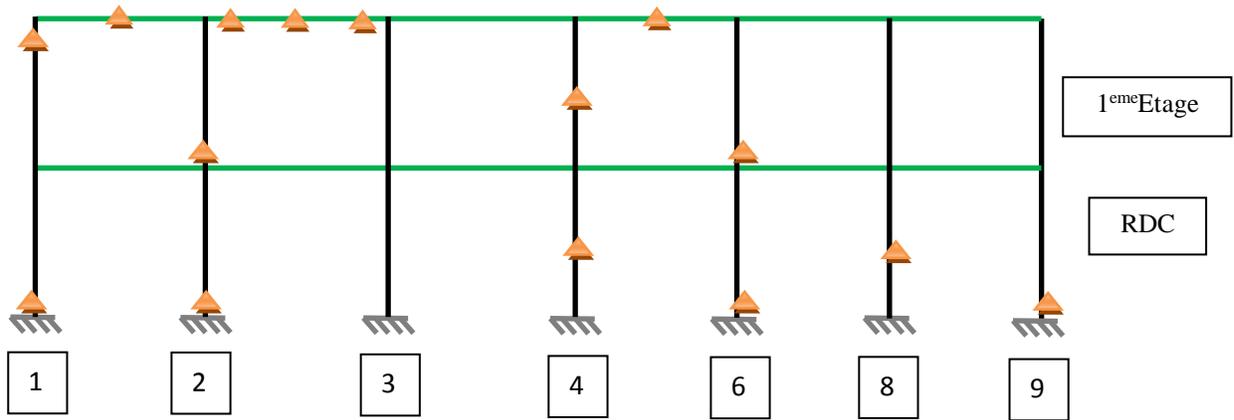


Fig.3.11- Exemples d'opérations de Carottage sur Poteau

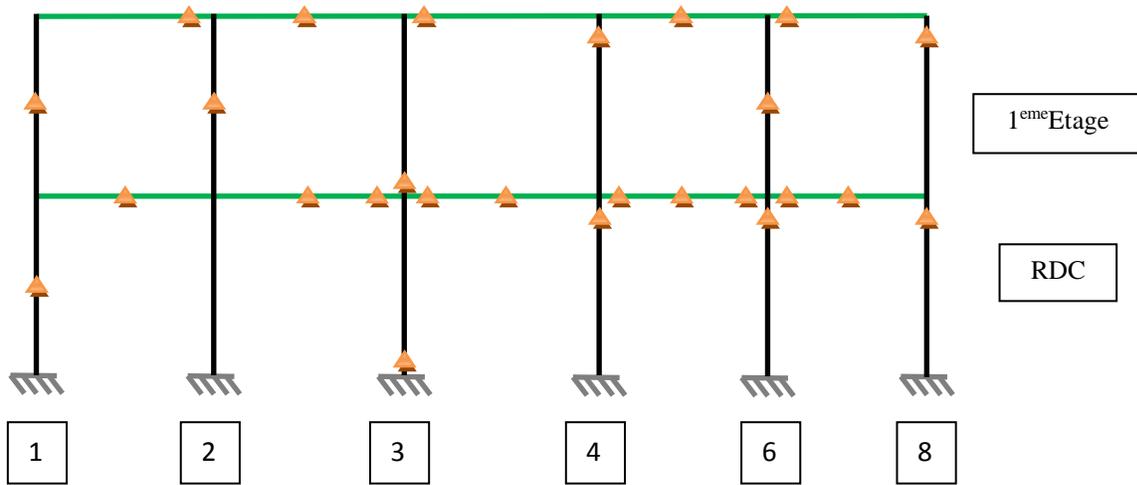
Fig.3.12- Les points de Carottage sélectionné pour chaque Poteau



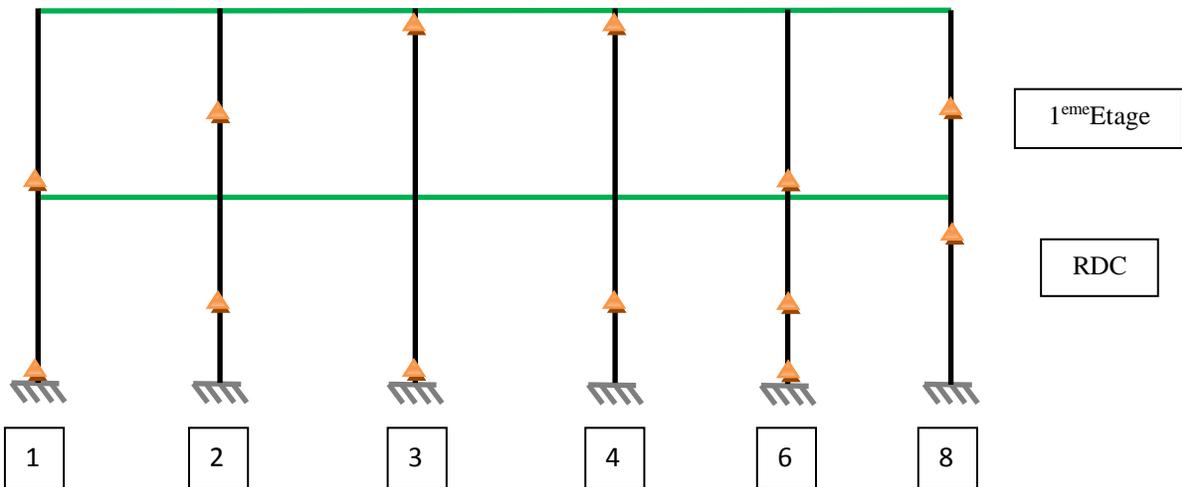
Portique de l'axe F



Portique de l'axe H



Portique de l'axe



Enfin, juste après avoir effectué le prélèvements de chaque carotte, nous avons pulvérisé une solution de phénophtaléine sur ces carottes dans le but de déterminer l'étendue de la pénétration du CO₂ dans le béton en mesurant 4 à 5 fois l'épaisseur de la non coloration de la carotte (Figure.3.13). La moyenne des 5 mesures représente la pénétration du CO₂ correspondante à chaque carotte ou la profondeur de carbonatation. Les carottes ont été conservées dans des glacières puis transportées au laboratoire.



Fig.3.13- Mesure de la Pénétration du CO₂ dans le béton

3.4. Essais en Laboratoire

Les carottes transportées vers le laboratoire, ont été rectifiées par découpage (Figure3.14), de façon à obtenir des élargissements définis par le règlement (Tableau 3.1) et les morceaux restants seront utilisés pour des essais d'absorption d'eau. Puis, nous avons effectués trois mesures sur les deux faces de la carotte et de sa longueur pour déterminer ses dimensions géométriques exactes (Figure 3.16), Des essais à l'ultrason par transmission directe ont été effectué (Figure. 3.15).



Fig.3.14- Découpage de Carotte



Fig.3.15- Mesure Ultrasonique sur Carotte

| Elancement L/D | 1 | 1.25 | 1.5 | 1.75 | 2 |
|--------------------|------|------|------|------|---|
| Coéf de Correction | 0.87 | 0.93 | 0.96 | 0.98 | 1 |

Tableau 3.1- Coefficients de Correction pour les Elancements des Carottes [17].

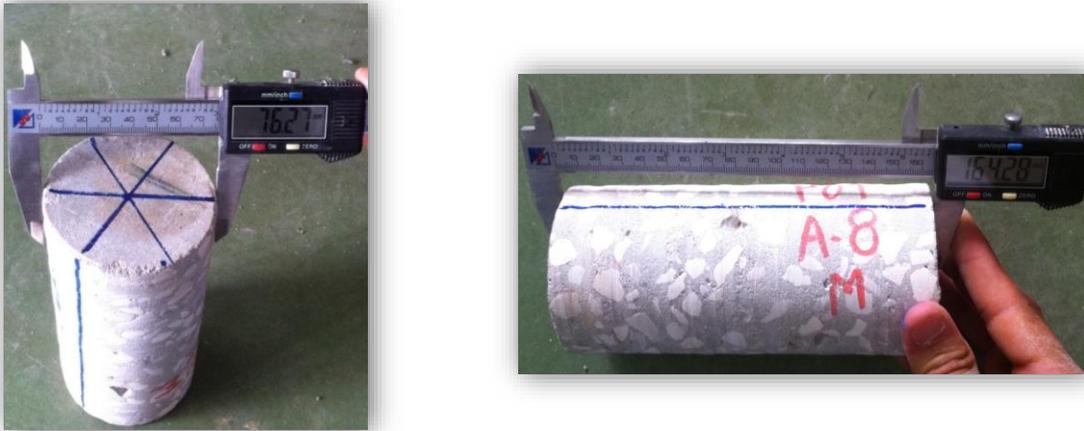


Fig.3.16- Mesure du Diamètre moyen

Lorsque les mesures par ultrason ont été réalisées, les carottes ont été préparées pour mise sous presse en rectifiant le niveau des 2 faces par surfaçage(Figure 3.17) , avec une épaisseur de 5mm de mortier de soufre à l'aide de moule dédié au carottes de 75mm de diamètre (Figure 3.18), Les carottes ont été ensuite laissées sécher pendant une durée de 2 heures minimum. Juste avant de commencer les écrasements, les carottes sont mises entre deux plateaux d'une presse, puis sont chargées par 15% de la charge maximale de rupture avec une vitesse 0.2 MPa/s à 1.0 MPa/s. Pour bien les fixés en vue de procéder à l'essai par scléromètre en effectuant neuf mesures sur la surface périphérique de la carotte. Le résultat final correspondant à chaque carotte est la médiane des indices enregistrés.



Fig.3.17- Carottes Surfaccées

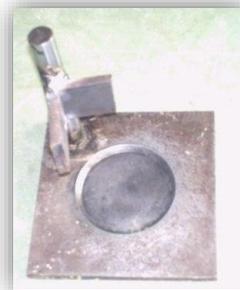


Fig.3.18-Moule de Surfaçage

Enfin, l'essai destructif a été effectué par écrasement de la carotte avec une charge appliquée jusqu'à la rupture (Figure 3.19). La charge obtenue est divisée par la section minimale des deux faces de la carotte pour l'obtention de la résistance finale en (MPa).

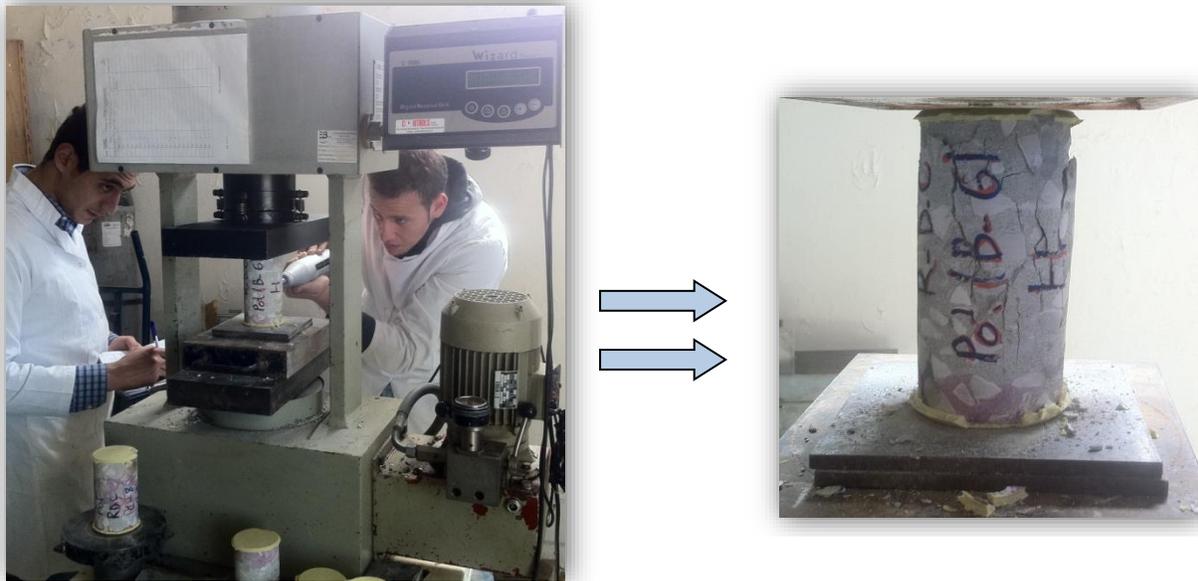


Fig.3.19-Exemple d'essais D'écrasement sur Carotte

Notre choix s'est porté sur la norme européenne qui définit un coefficient de correction (Equation 3.1), avec lequel nous avons corrigés les résistances correspondantes à chaque carotte en vue de leur comparaison avec des résultats d'éprouvettes Cubiques [16].

$$K_{is,cube} = \frac{2.5}{1.5 + \frac{1}{\lambda}} \dots \dots \dots \text{(Equation 3.1)}$$

On outre, il existe la norme américaine dans laquelle sont définie dans le (Tableau 3.1) des coefficients de correction représentés graphiquement dans la Figure 3.20. Pour les élancements non représentés dans le tableau, une interpolation est nécessaire en vue de déterminer son coefficient avec l'équation 3.2.

$$y = 0,213 x^3 - 1,04 x^2 + 1,766 x - 0,07 \dots \dots \dots \text{(Equation.3.2)}$$

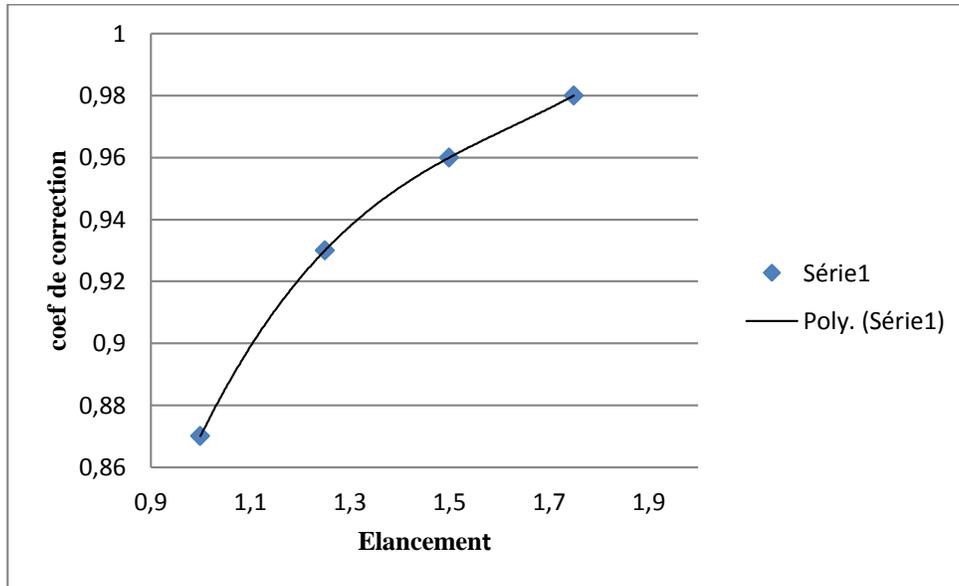


Fig.3.20- Courbe de tendance des coefficients de correction de la norme Américaine

❖ Essais d'Absorption Capillaire

Après découpage des carottes, les morceaux restant ont été utilisés dans l'essai d'absorption capillaire, en vue de déterminer la porosité totale du béton ou le coefficient d'absorption (Annexe IV).

Dans un premier temps, nous avons déterminé les dimensions géométriques des morceaux restants en effectuant 3 mesures sur leurs longueurs et leurs deux faces, le résultat final correspond à chaque morceau et la moyenne des trois mesures. Cela afin de déterminer les volumes et les densités correspondants à chaque morceau de chaque carotte. Puis après chaque étape de ce qui suit, tous les morceaux ont été pesés.

- Premièrement, à l'état Brut.
- Puis à l'état Sec, juste après avoir été mis dans des étuves pour sécher pendant 24h (Figure3.21) à une température de 105°C, soit $M_{sèche}$
- Ensuite, à l'état imbibé, après avoir été immergés dans un bassin plein d'eau pendant 24 h. (Fig.3.22), soit $M_{saturée}$
- Enfin, à l'état saturé, après avoir été immergés dans un bassin plein d'eau pendant 72 h, soit $M_{saturée}$.

Le coefficient d'absorption a été déterminé par l'équation suivante:

$$C_{\text{abso}} = \frac{m_{\text{sat}} - m_{\text{séche}}}{m_{\text{séche}}} * 100 \dots \dots \dots (\text{Equation.3.3})$$



Fig.3.21- Morceaux de carottes dans des étuves pour séchage.



Fig.3.22- Morceaux de carottes dans un bassin d'eau

Chapitre 4

PRESENTATION ET DISCUSSION DES **RESULTATS**

4.1 Introduction

Le travail visé dans ce chapitre est d'estimer la résistance à la compression du béton in situ en utilisant les essais non destructifs par scléromètre et ultrason, effectués sur les différents éléments de la structure. Nous visons à obtenir des corrélations, avec lesquelles nous pourrions déterminer la nature de la relation entre l'indice de rebondissement, la vitesse de propagation du son effectués in situ et la résistance à la compression des carottes prélevés des différents éléments de la structure.

4.2 Résultats des Essais Effectués

Le tableau 4.1 résume les résultats des essais au Scléromètre, Ultrason et écrasement des carottes des éléments sur lesquelles elles ont été prélevées, effectués in situ et en laboratoire.

Les résultats bruts sont donnés dans l'Annexe "III" et "IV".

Tableau.4.1- Résultats obtenus des Essais par Scléromètre, Ultrason et Ecrasement des Carottes

| Poteaux | | | | |
|------------|-------------|----------|----------------|-------|
| Niveau 3 | | Ind, med | Vitesse (km/s) | Rc |
| Poteau 4-C | Mi-Ht (1/2) | 31 | 3,66 | 13,90 |
| | Mi-Ht (2/2) | 31 | 3,66 | 9,42 |
| Poteau 6-C | Mi-Ht (1/2) | 36 | 3,98 | 21,62 |
| | Mi-Ht (2/2) | 36 | 3,98 | 11,24 |
| Poteau 6-D | Bas | 40 | 3,23 | 22,33 |
| Poteau 4-D | Bas (1/2) | 30 | 3,65 | 15,98 |
| | Bas (2/2) | 30 | 3,65 | 11,83 |
| Niveau 2 | | Ind, med | Vitesse (km/s) | Rc |
| Poteau 3-A | Bas | 32 | 3,23 | 9,09 |
| | Mi-Ht | 34 | 3,36 | 13,92 |
| | Haut | 30 | 3,35 | 14,79 |
| Poteau 4-A | Bas | 30 | 2,91 | 9,60 |
| | Mi-Ht | 35 | 3,33 | 14,55 |
| | Haut | 33 | 3,30 | 13,35 |
| Poteau 6-A | Bas | 27 | 2,93 | 8,56 |
| | Mi-Ht | 31 | 3,14 | 7,68 |
| Poteau 8-A | Mi-Ht | 41 | 3,49 | 18,66 |
| Poteau 9-A | Bas | 36 | 3,93 | 24,69 |
| Poteau 9-B | Bas | 36 | 3,05 | 15,70 |
| Poteau 8-B | Bas (1/2) | 35 | 3,53 | 13,60 |
| | Bas (2/2) | 35 | 3,53 | 13,21 |
| Poteau 6-B | Bas | 36 | 3,40 | 13,17 |

| Poteau 4-B | Bas | 31 | 3,04 | 7,60 |
|------------|-----------|----------|----------------|-------|
| Poteau 3-B | Bas | 34 | 3,46 | 15,38 |
| Poteau 3-C | Bas | 32 | 3,30 | 14,98 |
| Poteau 4-C | Mi-Ht | 28 | 2,87 | 6,68 |
| Poteau 6-C | Haut | 28 | 3,25 | 8,80 |
| Poteau 8-C | Mi-Ht | 30 | 3,08 | 11,15 |
| Poteau 9-C | Haut | 30 | 3,13 | 6,92 |
| Poteau 9-D | Haut | 31 | 3,24 | 13,31 |
| Poteau 8-D | Haut | 29 | 3,24 | 14,50 |
| Poteau 6-D | Haut | 30 | 3,51 | 13,65 |
| Poteau 4-D | Haut(1/2) | 30 | 3,46 | 12,10 |
| | Haut(2/2) | 30 | 3,46 | 12,23 |
| Poteau 3-D | Haut | 31 | 3,78 | 22,98 |
| Niveau 1 | | Ind, med | Vitesse (km/s) | Rc |
| Poteau 3-A | Bas | 34 | 3,96 | 21,35 |
| | Haut | / | / | 8,49 |
| Poteau 4-A | Mi-Ht | 40 | 3,80 | 18,76 |
| Poteau 6-A | Bas | 37 | 3,69 | 15,03 |
| Poteau 8-A | Mi-Ht | 30 | 3,54 | 13,19 |
| Poteau 9-A | Mi-Ht | 38 | 3,84 | 16,38 |
| Poteau 9-B | Haut | / | / | 23,52 |
| Poteau 8-B | Bas (1/2) | 32 | 3,50 | 11,98 |
| Poteau 6-B | Haut | 29 | 3,09 | 6,98 |
| Poteau 4-B | Bas | 29 | 3,64 | 15,61 |
| Poteau 3-C | Mi-Ht | 32 | 3,70 | 18,71 |

Présentation et Discussion des Résultats

| | | | | |
|-------------------|-------------|----------|----------------|-------|
| Poteau 4-C | Mi-Ht | 32 | 3,30 | 10,13 |
| Poteau 6-C | Haut | 38 | 3,70 | 13,01 |
| Poteau 8-C | Mi-Ht | 33 | 3,45 | 14,19 |
| Poteau 9-C | Haut | 33 | 3,67 | 20,26 |
| Poteau 9-D | Bas | 34 | 3,60 | 16,16 |
| Poteau 8-D | Bas | 33 | 3,63 | 24,00 |
| Poteau 6-D | Mi-Ht | 40 | 3,87 | 26,73 |
| Poteau 4-D | Haut | 32 | 3,83 | 18,37 |
| Poteau 3-D | Haut | 41 | 3,64 | 28,49 |
| Poteau 2-E | Bas | 42 | 4,12 | 26,60 |
| Poteau 3-E | Mi-Ht | 35 | 3,74 | 18,95 |
| Poteau 4-E | Mi-Ht | 41 | 4,03 | 8,44 |
| | Haut | 38 | / | 26,83 |
| Poteau 6-E | Bas | 33 | 4,30 | 12,91 |
| Poteau 8-E | Mi-Ht | 35 | 4,33 | 19,86 |
| | Haut | 32 | 4,36 | 12,46 |
| Poteau 9-E | Bas | 35 | 3,69 | 20,55 |
| | Haut | 32 | | 16,86 |
| Poteau 6-F | Bas | 40 | 3,72 | 16,66 |
| Poteau 4-F | Mi-Ht | 40 | 3,70 | 12,12 |
| Poteau 2-F | Bas | 40 | 3,84 | 16,98 |
| Poteau 1-F | Haut | / | / | 22,99 |
| Poteau 1-H | Mi-Ht | 40 | 3,99 | 19,21 |
| Poteau 2-H | Mi-Ht (1/2) | 39 | 3,98 | 18,55 |
| | Mi-Ht (2/2) | 39 | 3,98 | 18,52 |
| Poteau 3-H | Bas | 37 | 3,89 | 16,98 |
| Poteau 4-H | Haut | 33 | / | 14,60 |
| Poteau 6-H | Mi-Ht | 34 | 3,80 | 10,74 |
| Poteau 8-H | Haut | 29 | 3,51 | 18,32 |
| Poteau 8-I | Mi-Ht | 40 | 4,07 | 21,21 |
| Poteau 6-I | Bas | 41 | 4,22 | 25,31 |
| Poteau 4-I | Haut | / | / | 16,31 |
| Poteau 3-I | Haut (1/2) | 34 | / | 19,45 |
| | Haut (2/2) | 34 | / | 22,09 |
| Poteau 2-I | Mi-Ht | 40 | 4,08 | 17,34 |
| Poteau 1-I | Bas | 37 | 3,88 | 22,77 |
| Niveau RDC | | | | |
| | | Ind, med | Vitesse (km/s) | Rc |
| Poteau 3-A | Bas | 41 | 4,10 | 22,04 |
| Poteau 4-A | Mi-Ht | 40 | 3,94 | 26,90 |
| Poteau 6-A | Bas | 26 | 2,98 | 5,50 |
| Poteau 8-A | Mi-Ht | 41 | 3,96 | 29,48 |
| Poteau 9-A | Mi-Ht | 42 | 4,08 | 27,28 |
| Poteau 6-B | Haut | 27 | / | 7,96 |
| Poteau 3-B | Haut | 24 | / | 4,80 |

| | | | | | |
|-----------------|------------|----|----------|----------------|----|
| Poteau 3-C | Mi-Ht | 29 | 2,99 | 12,11 | |
| Poteau 8-C | Mi-Ht | 32 | 3,23 | 12,89 | |
| Poteau 9-C | Haut | 28 | / | 14,13 | |
| Poteau 9-D | Bas | 34 | 3,04 | 12,81 | |
| Poteau 8-D | Bas | 31 | 3,55 | 13,72 | |
| Poteau 6-D | Mi-Ht | 27 | 3,10 | 7,42 | |
| Poteau 4-D | Haut | 26 | / | 19,23 | |
| Poteau 3-D | Haut | / | / | 12,33 | |
| Poteau 1-E | Haut (1/2) | 30 | 3,84 | 16,31 | |
| | Haut (2/2) | 30 | 3,84 | 14,63 | |
| Poteau 2-E | Bas (1/2) | 38 | 4,06 | 23,33 | |
| Poteau 3-E | Mi-Ht | 31 | 3,78 | 14,98 | |
| Poteau 4-E | Haut | 27 | / | 11,46 | |
| Poteau 6-E | Bas | 27 | 3,49 | 9,95 | |
| Poteau 8-E | Haut | 27 | / | 10,54 | |
| Poteau 9-E | Haut | 26 | / | 13,22 | |
| Poteau 9-F | Bas | 32 | 3,80 | 13,87 | |
| Poteau 8-F | Mi-Ht | 35 | 3,56 | 20,09 | |
| Poteau 6-F | Bas | 38 | 4,04 | 30,30 | |
| Poteau 4-F | Mi-Ht | 38 | 3,88 | 24,30 | |
| Poteau 2-F | Bas | 41 | 3,96 | 18,67 | |
| Poteau 1-F | Bas | 35 | 3,90 | / | |
| Poteau 1-H | Mi-Ht | 34 | 3,80 | 15,53 | |
| Poteau 3-H | Bas | 42 | 3,93 | 16,27 | |
| Poteau 4-H | Haut | 31 | 3,89 | 12,20 | |
| Poteau 6-H | Haut | 30 | 3,91 | 25,24 | |
| Poteau 8-H | Haut | 29 | 3,51 | 19,14 | |
| Poteau 8-I | Mi-Ht | / | / | 19,26 | |
| Poteau 6-I | Bas | 31 | 3,77 | 17,50 | |
| | Mi-Ht | 33 | 3,57 | 19,25 | |
| Poteau 4-I | Mi-Ht | 36 | 3,74 | 14,61 | |
| Poteau 3-I | Bas | 44 | 4,20 | 24,01 | |
| Poteau 2-I | Mi-Ht | 42 | 4,04 | 28,04 | |
| Poteau 1-I | Bas | 29 | 4,10 | 22,27 | |
| Poutres | | | | | |
| Niveau 2 | | | Ind, med | Vitesse (km/s) | Rc |
| Poutre B 8-9 | Gauche | 29 | 3,48 | 14,28 | |
| Poutre B 6-8 | Mi-tr | 26 | 3,23 | 9,44 | |
| Poutre B 4-6 | Gauche | 24 | 3,06 | 9,97 | |
| | Droite | 30 | 3,35 | 19,03 | |

Présentation et Discussion des Résultats

| | | | | |
|-----------------|--------------|-----------------|-----------------------|-----------|
| Poutre B 3-4 | Gauche (1/2) | 28 | 3,41 | 12,47 |
| | Gauche (2/2) | 28 | 3,41 | 21,87 |
| | Mi-tr | 24 | 3,25 | 13,13 |
| | Droite | 25 | 3,17 | 11,72 |
| Poutre C 3-4 | Droite | 30 | 3,59 | 16,63 |
| Poutre C 6-8 | Droite | 26 | 3,29 | 14,54 |
| Poutre C 8-9 | Mi-tr | 33 | 3,17 | 10,34 |
| Poutre D 8-9 | Gauche | 31 | 3,49 | 20,11 |
| | Mi-tr | 27 | 3,93 | 14,40 |
| Poutre D 6-8 | Droite | 37 | 3,54 | 23,84 |
| Poutre D 3-4 | Mi-tr | 24 | 3,18 | 9,24 |
| Niveau 1 | | Ind, med | Vitesse (km/s) | Rc |
| Poutre B 8-9 | Mi-tr | 32 | 3,44 | 16,17 |
| | Droite | 31 | 3,51 | 12,14 |
| Poutre B 6-8 | Gauche | 34 | 3,75 | 20,48 |
| | Gauche | 34 | 3,75 | 21,69 |
| | Mi-tr (1/2) | 34 | 3,68 | 9,04 |
| | Mi-tr (2/2) | 34 | 3,68 | 18,67 |
| Poutre B 4-6 | Gauche | 40 | 4,06 | 25,66 |
| | Mi-tr | 41 | 4,19 | 12,48 |
| Poutre B 3-4 | Gauche (1/2) | 32 | 3,61 | 9,98 |
| | Gauche (2/2) | 32 | 3,61 | 12,90 |
| | Mi-tr (1/3) | 38 | 3,91 | 24,48 |
| | Mi-tr (2/3) | 38 | 3,91 | 11,89 |
| | Mi-tr (3/3) | 38 | 3,91 | 17,76 |
| Poutre C 3-4 | Gauche | 33 | 3,75 | 22,47 |
| Poutre C 4-5 | Mi-tr | / | / | 13,32 |
| Poutre C 6-8 | Mi-tr(1/2) | 35 | 3,73 | 13,84 |
| | Droite (1/2) | 36 | 3,81 | 22,44 |
| | Droite (2/2) | 36 | 3,81 | 16,25 |
| Poutre C 8-9 | Gauche (2/3) | / | 3,41 | 7,56 |
| | Mi-tr (2/2) | / | 3,60 | 13,09 |
| Poutre D 4-5 | Mi-tr | / | / | 23,55 |
| Poutre F 1-2 | Mi-tr | 34 | 3,73 | 17,60 |
| Poutre F 2-3 | Gauche | 35 | 3,67 | 16,58 |
| | Mi-tr | 37 | 4,07 | 22,70 |
| | Droit | 34 | 3,90 | 22,58 |
| Poutre F 4-6 | Mi-tr | 36 | 4,24 | 18,87 |

| | | | | |
|-------------------|--------------|-----------------|-----------------------|-----------|
| Poutre H 1-2 | Droite | 34 | 3,88 | 26,50 |
| Poutre H 2-3 | Mi-tr | 38 | 4,12 | 25,16 |
| Poutre H 3-4 | Gauche | 36 | 3,87 | 30,28 |
| Poutre H 4-6 | Mi-tr | 37 | 3,93 | 21,58 |
| Poutre H 6-8 | Gauche | 40 | 4,17 | 19,63 |
| Niveau RDC | | Ind, med | Vitesse (km/s) | Rc |
| Poutre B 8-9 | Gauche | 36 | 3,90 | 26,60 |
| | Mi-tr | 35 | 3,29 | 11,93 |
| Poutre B 6-8 | Droite | 40 | 4,20 | 18,81 |
| Poutre B 4-6 | Mi-tr | 38 | 4,13 | 25,73 |
| | Droite | 35 | 3,96 | 15,74 |
| Poutre B 3-4 | Gauche | 32 | 3,86 | 17,95 |
| Poutre C 3-4 | Mi-tr | 33 | 3,68 | 13,83 |
| | Droite | 34 | 3,98 | 23,82 |
| Poutre C 4-5 | Mi-tr | / | / | 17,57 |
| | Mi-tr | 38 | 3,67 | 17,31 |
| Poutre C 6-8 | Droite | / | 3,75 | 13,95 |
| | Mi-tr | 43 | 3,92 | 33,75 |
| Poutre C 8-9 | Droite | 37 | 4,08 | 27,90 |
| | Mi-tr | / | / | 26,50 |
| Poutre F 1-2 | Gauche | 31 | 3,78 | 18,86 |
| | Mi-tr | 38 | 3,92 | 14,44 |
| | Droite | 36 | 3,78 | 24,63 |
| Poutre F 2-3 | Gauche | 31 | 3,48 | 12,59 |
| | Mi-tr | 34 | 3,82 | 15,02 |
| | Droite | 34 | 3,62 | 9,70 |
| Poutre F 3-4 | Mi-tr | / | / | 28,58 |
| Poutre F 4-6 | Gauche | 37 | 3,71 | 29,12 |
| | Droite | 37 | 3,61 | 19,12 |
| Poutre H 1-2 | Mi-tr(1/2) | 37 | 3,71 | 7,12 |
| | Mi-tr(2/2) | 37 | 3,71 | 18,58 |
| Poutre H 2-3 | Mi-tr | 36 | 3,80 | 24,88 |
| | Droite | 37 | 3,96 | 17,84 |
| Poutre H 3-4 | Gauche (1/2) | 34 | 3,75 | 21,41 |
| | Gauche (2/2) | 34 | 3,75 | 23,68 |
| | Mi-tr | 36 | 4,01 | 29,71 |
| Poutre H 4-6 | Gauche | 40 | 3,94 | 15,15 |
| | Mi-tr | 33 | 3,53 | 16,08 |
| | Droite | 38 | 3,92 | 23,12 |
| Poutre H 6-8 | Gauche | 38 | 3,91 | 12,06 |
| | Mi-tr | 34 | 3,71 | 17,19 |
| Poutre E, 3-4 | Mi-tr | / | / | 24,10 |

4.3 Etude statistique sur les résultats obtenus par scléromètre

Le **Tableau 4.2** présente les statistiques de l'indice de rebondissement moyen, de l'écart type et du coefficient de variation, selon le type d'élément, les différents niveaux et les différentes zones d'essais (Bas, Mi-ht, et Haut) pour les poteaux et (Gauche, Mi-tr, Droite) pour les poutres.

Nous pouvons voir que:

- l'indice de rebondissement moyen de tous les éléments est de $I = 33.3$, que l'écart type est de 4.79 et que le coefficient de variation C_v est de $= 14\%$. Ceci montre que ce béton est un béton de qualité moyenne avec une dispersion importante des résultats.
- l'indice de rebondissement moyen des poutres est légèrement inférieur à celui des poteaux. Probablement en raison de la vibration due au poids propre du béton.
- il existe une variation significative entre l'indice moyen des poteaux dans les différents niveaux de la structure. Ceci est du probablement à la différence de mise en œuvre des différents niveaux.
- L'écart type moyen dans les poutres est légèrement inférieur à celui des poteaux, en raison du coulage simultané des poutres, contrairement aux poteaux.
- la moyenne générale de l'indice de rebondissement des zones basses des poteaux est supérieure à celles des zones à mi-hauteur et des zones hautes. Ceci est probablement dû au compactage de cette zone et à la ségrégation des poteaux par poids propre des granulats.

Les Tableaux de l'**Annexe "III"** présente les indices de rebondissements selon les zones d'essais. Le nombre d'essais sur les différentes zones est défini comme suite:

Pour les Poteaux

- Zones du Bas (111)
- Zones de la Mi-hauteur (111)
- Zones du Haut (82)

Pour les Poutres

- Zones de Gauche (40)
- Zones de la Mi- travée (43)
- Zones de droite (42)

4.4 Etude statistique sur les résultats obtenus par Ultrason

Le **Tableau 4.3** présente des statistiques de la vitesse de propagation du son, de l'écart type et du coefficient de variation, selon le type d'élément, les différents niveaux et les différentes zones d'essais (Bas, Mi-haut, et Haut) pour les poteaux et (Gauche, Mi-travée, Droite) pour les poutres.

Nous pouvons voir que:

- La vitesse moyenne de tous les éléments est de **$V = 3643.74 \text{ m/s}$** , avec un écart type de **343.5 m/s** et un coefficient de variation est de **$C_v = 9\%$** . Ceci montre que c'est un béton de bonne qualité (Tableau 2.3, Chapitre 2) contrairement à l'indice sclérométrique.
- Le coefficient de variation moyen pour la vitesse ultrasonique est de **9%** en comparaison avec l'indice sclérométrique qui est de **14%** .
- La vitesse ultrasonique est plus faible dans les zones supérieures des poteaux. Ceci est prévisible car le béton dans ces zones est moins vibré et aussi plus affecté par le phénomène de ressuage.
- La vitesse moyenne des poteaux **$V = 3606.2 \text{ m/s}$** est légèrement inférieur à celle des poutres (**$V = 3681.3 \text{ m/s}$**).
- Il existe une variation significative entre la vitesse moyenne des poteaux et des poutres dans les différents niveaux de la structure.

Les Tableaux de l'**Annexe "IV"** présente les vitesses ultrasoniques, selon les zones d'essais. Le nombre d'essais sur les différentes zones est défini comme suite:

Pour les Poteaux

- Zones du Bas (110)
- Zones de la Mi-hauteur (111)
- Zones du Haut (68)

Pour les Poutres

- Zones de Gauche (39)
- Zones de la Mi-travée (40)
- Zones de droite (39)

4.5 Etude statistique sur les résultats obtenus par Ecrasement des Carottes

Le **Tableau 4.4** présente des statistiques de la résistance obtenue par écrasement de carottes, de l'écart type et du coefficient de variation, selon le type d'élément, les différents niveaux et les différentes zones d'essais (Bas, Mi-haut, et Haut) pour les poteaux et (Gauche, Mi-travée, Droite) pour les poutres.

Nous pouvons voir que:

- la résistance moyenne de tous les éléments est de **$R = 17.13 \text{ MPa}$** avec un écart type de **5.94 MPa** et un coefficient de variation est de **$C_v = 35\%$** . Ceci montre que le béton est de faible résistance et présente une dispersion importante de résistance.
- la résistance moyenne des poteaux est inférieure à celle des poutres. Ceci est probablement dû au coulage simultané des poutres.
- il existe une variation significative entre la résistance moyenne des poteaux et des poutres dans les différents niveaux de la structure qui varie de **13 MPa** à **19.84 MPa** .

Le Tableau 4.1 résume les résistances obtenues par écrasement, selon les zones d'essais. Le nombre d'essais sur les différentes zones est défini comme suit:

Pour les Poteaux

- Zones du Bas (41)
- Zones de la Mi-hauteur (40)
- Zones du Haut (40)

Pour les Poutres

- Zones de Gauche (24)
- Zones de la Mi-travée (38)
- Zones de droite (20)

4.6 Corrélations

Les corrélations visées ont été obtenue en effectuant plusieurs combinaisons de Variables : Indice de rebondissement "I", Vitesse Ultrasonique "V" et la Résistance à la compression "R" telle que présentées dans le Tableau.4.1. Les corrélations $R = f(I)$ et $R = f(V)$ ont été déterminé pour les cas suivants:

❖ Corrélations Globales

- Tous les éléments.
- Tous les éléments par blocs.
- Tous les éléments avec leurs carottes correspondantes.
- Poteaux avec poutres.

❖ Corrélations pour poteaux

- Par bloc.
- Par niveau.
- Avec les carottes correspondantes.

❖ Corrélations pour poutres

- Par bloc.
- Par niveau.
- Avec les carottes correspondantes.

Une étude comparative des corrélations obtenues a été réalisée avec celles proposées par d'autres chercheurs.

❖ Corrélation par la méthode Combinée.

Une corrélation combinée en utilisant les trois variables Indice de rebondissement, vitesse de propagation du son et la résistance à la compression a aussi été effectué.

4.6.1 Corrélation entre l'Indice de rebondissement et la résistance

4.6.1.1 Corrélations global de tous les éléments de la structure

La **Figure 4.1** montre une courbe de corrélation développée entre la résistance à la compression par écrasement «R» et l'indice de rebondissement «I» correspondant. L'expression proposée à cette corrélation est une fonction de forme puissance présentée par l'équation (4.1) avec un coefficient de corrélation $r = 0.622$ et un écart type $s = 4.23\text{MPa}$.

$$R = 0,043 * I^{1,684} \dots\dots\dots \text{Équation (4.1)}$$

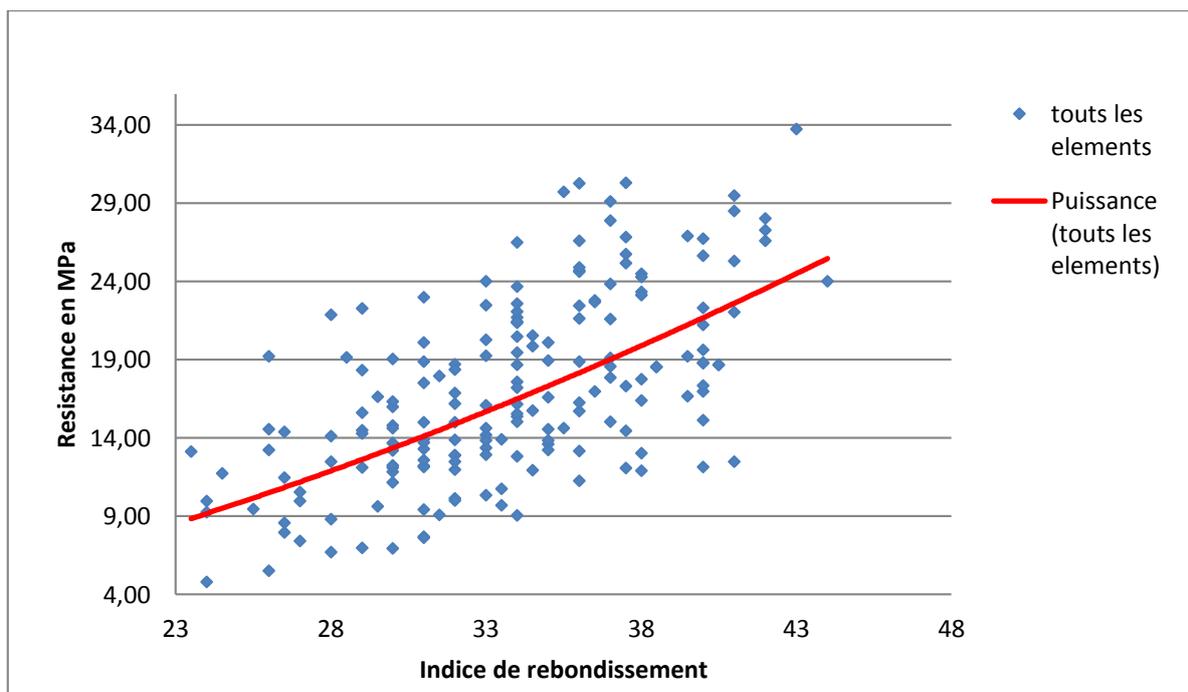


Fig.4.1-Corrélation développée sur tous les éléments

D'après la figure 4.1, on peut conclure qu'il existe une faible corrélation ($r = 0.622$) entre les résistances à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants. Ceci est dû à la variabilité élevée de la qualité du béton en raison du manque de contrôle de qualité.

Des résultats de corrélation similaires ont été trouvés par d'autres chercheurs Algérien en effectuant des études sur des bétons de la région de Médéa, Blida et Chlef [2] [39] [40].

4.6.1.2 Corrélations de tous les éléments par Bloc

La **Figure 4.2** montre deux courbes de corrélation développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les indices de rebondissement «I» correspondants. Les expressions proposées à cette corrélation sont les suivantes:

| Blocs | Bloc A | Bloc B |
|-----------|------------------------|-----------------------|
| r | 0,636 | 0,530 |
| Equations | $R = 2,449e^{0,054*I}$ | $R = 0,194*I^{1,281}$ |

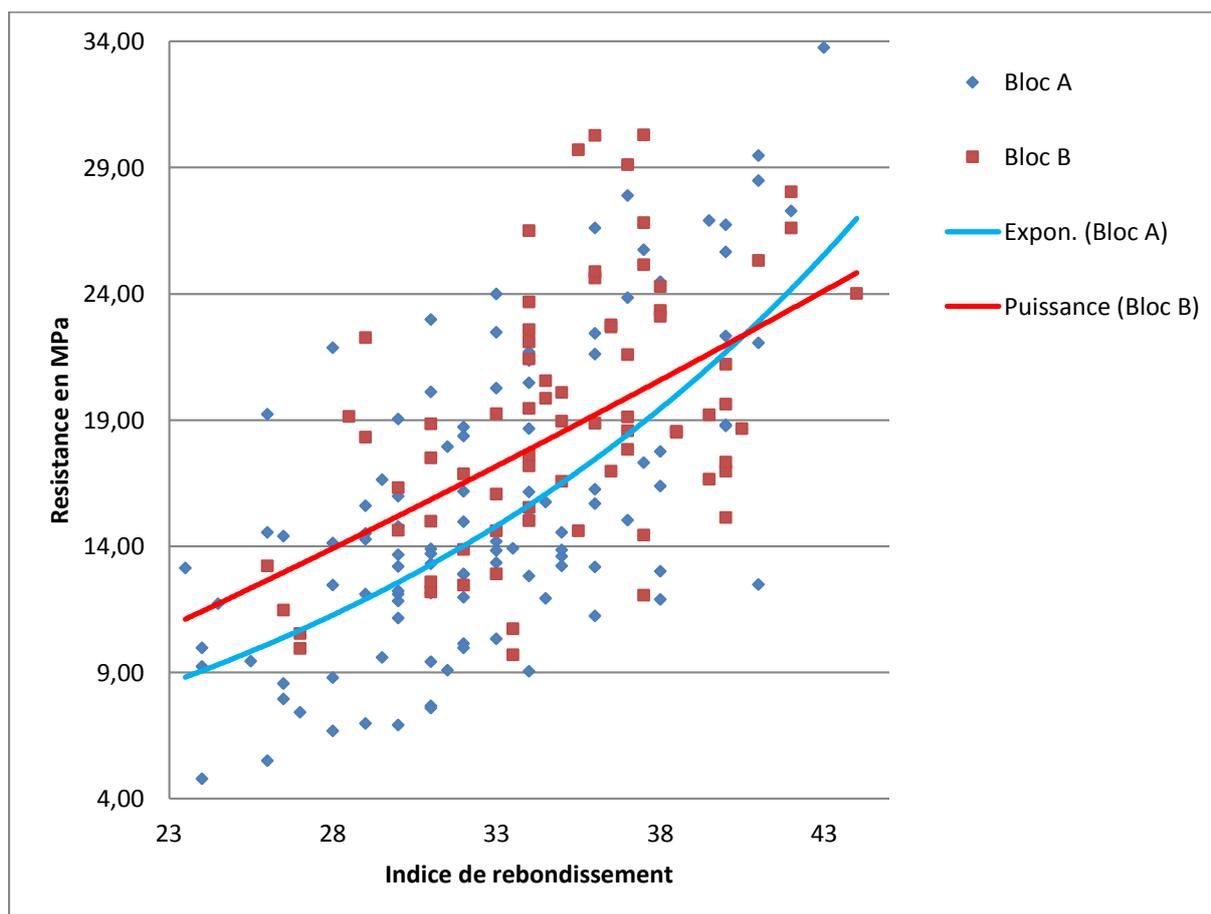


Fig.4.2-Corrélations développées par bloc

D'après la figure 4.2, on peut conclure que les deux corrélations sont faibles ($r = 0.636$ et $r = 0.530$). On constate aussi que la corrélation est meilleure pour le bloc A que pour le bloc B, probablement en raison de la variabilité de mise en œuvre.

4.6.1.3 Corrélations des indices mesurés sur les carottes correspondantes

La **Figure 4.3** compare les corrélations développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les indices de rebondissement «I» correspondants sur carottes avec celles développées sur éléments. Les expressions proposées à cette corrélation sont les suivantes:

| Objets | Carottes | Eléments |
|-----------|-------------------------|-------------------------|
| r | 0,563 | 0,622 |
| Equations | $R = 0,086 * I^{1,532}$ | $R = 0,043 * I^{1,684}$ |

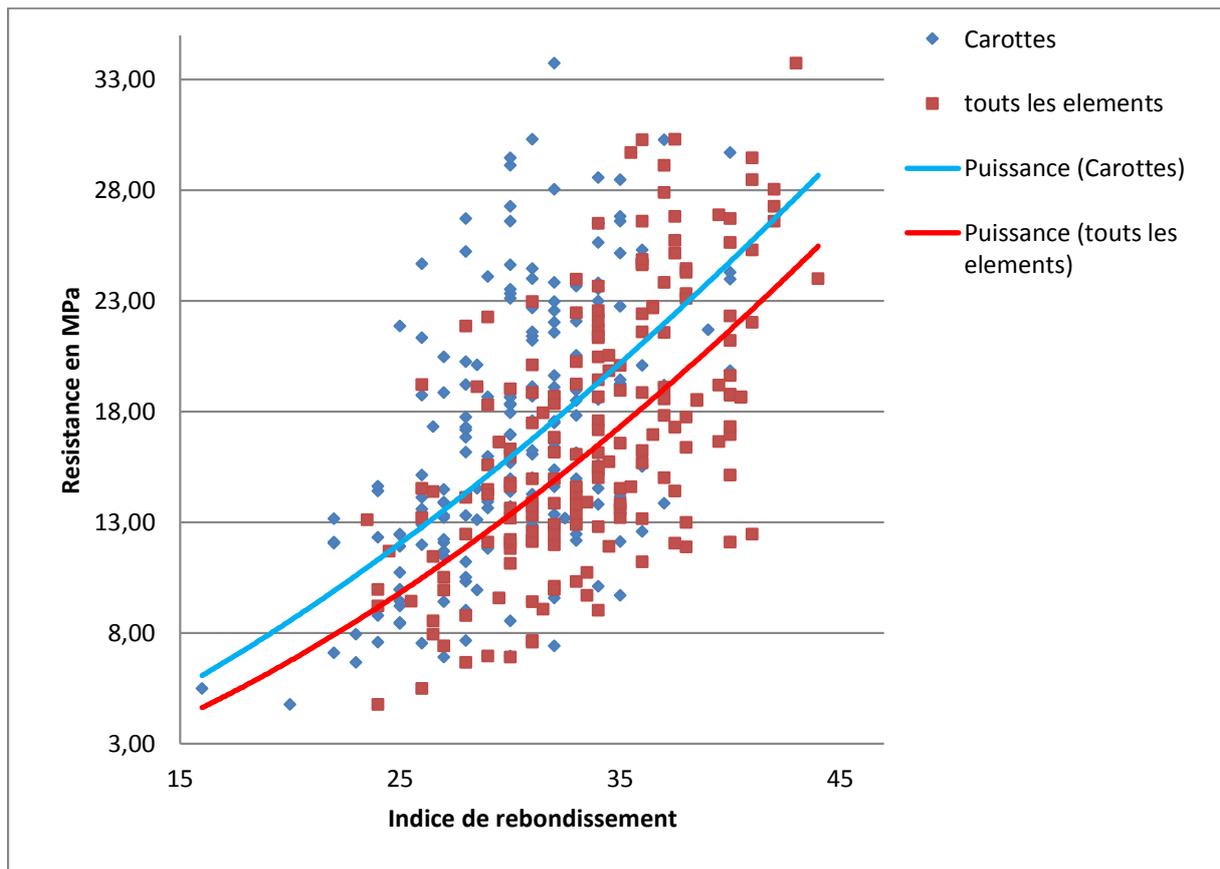


Fig.4.3-Corrélations Développées pour Eléments et Carottes

D'après la figure 4.3, on peut conclure que les deux corrélations sont faibles ($r = 0.622$ et $r = 0.563$). On constate aussi que le coefficient de corrélation est plus élevé pour les éléments que pour les carottes. Cependant, l'estimation de la résistance par les essais au scléromètre sur carottes donne des résistances plus élevées que l'estimation par les essais sclérométriques sur éléments. Les essais sur carottes sont plus représentatifs que sur éléments.

4.6.1.4 Corrélations pour tous les poteaux et toutes les poutres

La **Figure 4.4** montre deux courbes de corrélation développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les indices de rebondissement «I» correspondants. Les expressions proposées à cette corrélation sont les suivantes:

| Eléments | Poteaux | Poutres |
|-----------|-------------------------|--------------------------|
| r | 0,737 | 0,726 |
| Equations | $R = 0,009 * I^{2,112}$ | $R = 2,799e^{0,055 * I}$ |

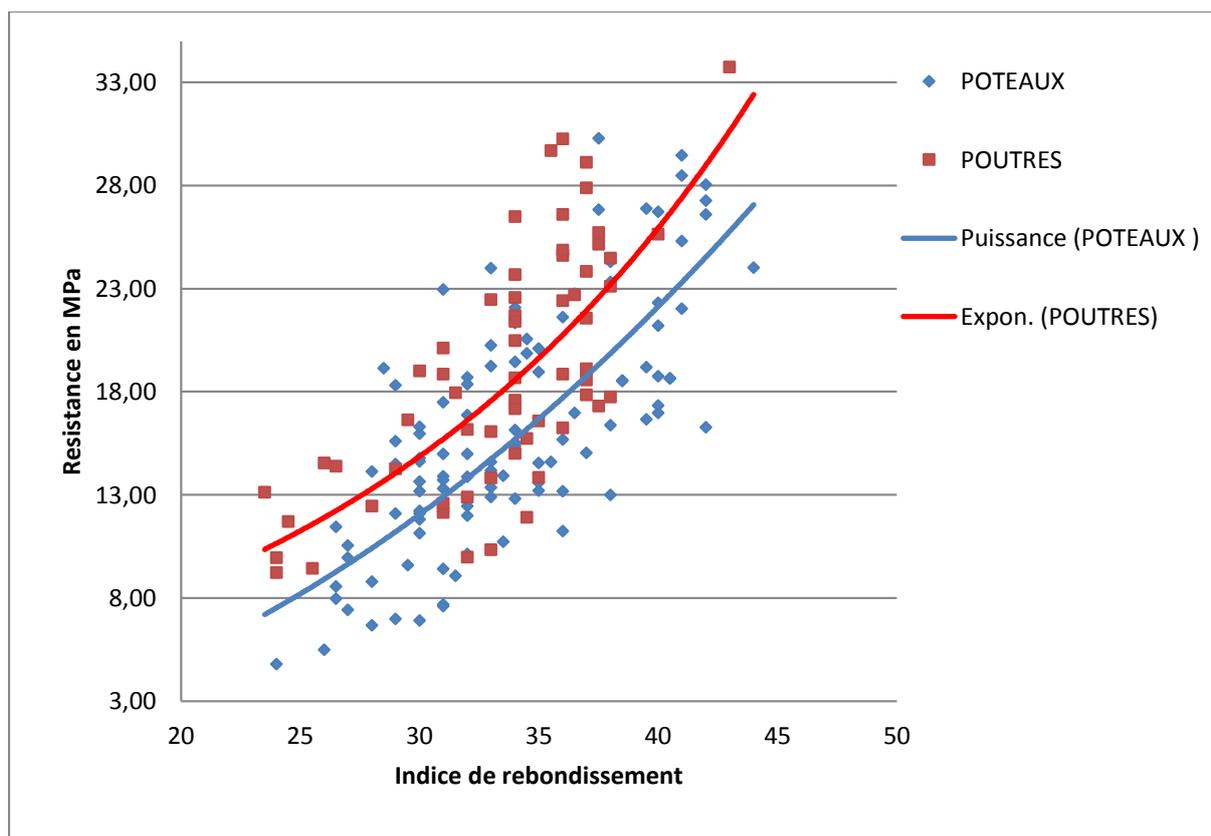


Fig.4.4-Corrélations Développées pour Poteaux et Poutres

D'après la **figure 4.4**, on peut conclure que les deux corrélations entre les résistances à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants sont faibles ($r = 0.737$ et $r = 0.726$).

Les résistances estimées pour les poutres sont plus élevées que celle des poteaux. Le coulage simultané des poutres lors du coulage du plancher et la possibilité de bien vibrer les poutres peut expliquer partiellement ces résultats.

4.6.1.5 Corrélations pour poteaux seuls

4.6.1.5.1 Corrélation par bloc

La **Figure 4.5** montre les courbes de corrélation développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les indices de rebondissement «I» correspondants pour les deux blocs. Les expressions proposées à cette corrélation sont les suivantes:

| Blocs | Bloc A | Bloc B |
|-----------|-------------------------|-------------------------|
| r | 0,781 | 0,736 |
| Equations | $R = 0,002 * I^{2,482}$ | $R = 0,103 * I^{1,447}$ |

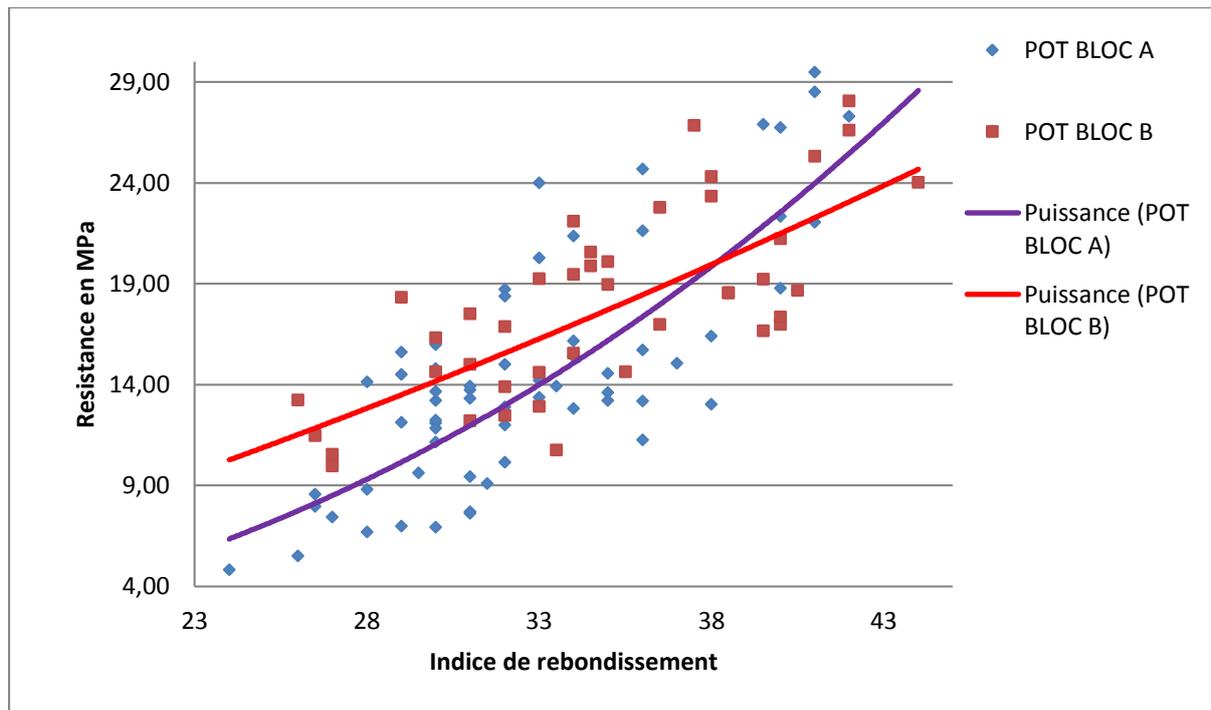


Fig.4.5-Corrélations développées par bloc (Poteaux)

D'après la **figure 4.5**, on peut conclure que les deux corrélations sont acceptables (**r = 0.781** et **r = 0.736**). La résistance estimée pour le bloc B est légèrement supérieure à celle du bloc A.

4.6.1.5.2 Corrélation par niveau

Les **Figures 4.6 et 4.7** montrent des courbes de corrélation développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les indices de rebondissement «I» correspondants. Les expressions proposées à ces corrélations sont les suivantes:

| Bloc A | RDC | Niveau 1 | Niveau 2 | Niveau 3 |
|-----------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| r | 0,939 | 0,76 | 0,762 | 0,664 |
| Equations | $R = 0,018 I^2 - 0,117I - 1,701$ | $R = 0,825e^{0,089*I}$ | $R = 0,020*I^{1,846}$ | $R = 0,863*I - 13,68$ |

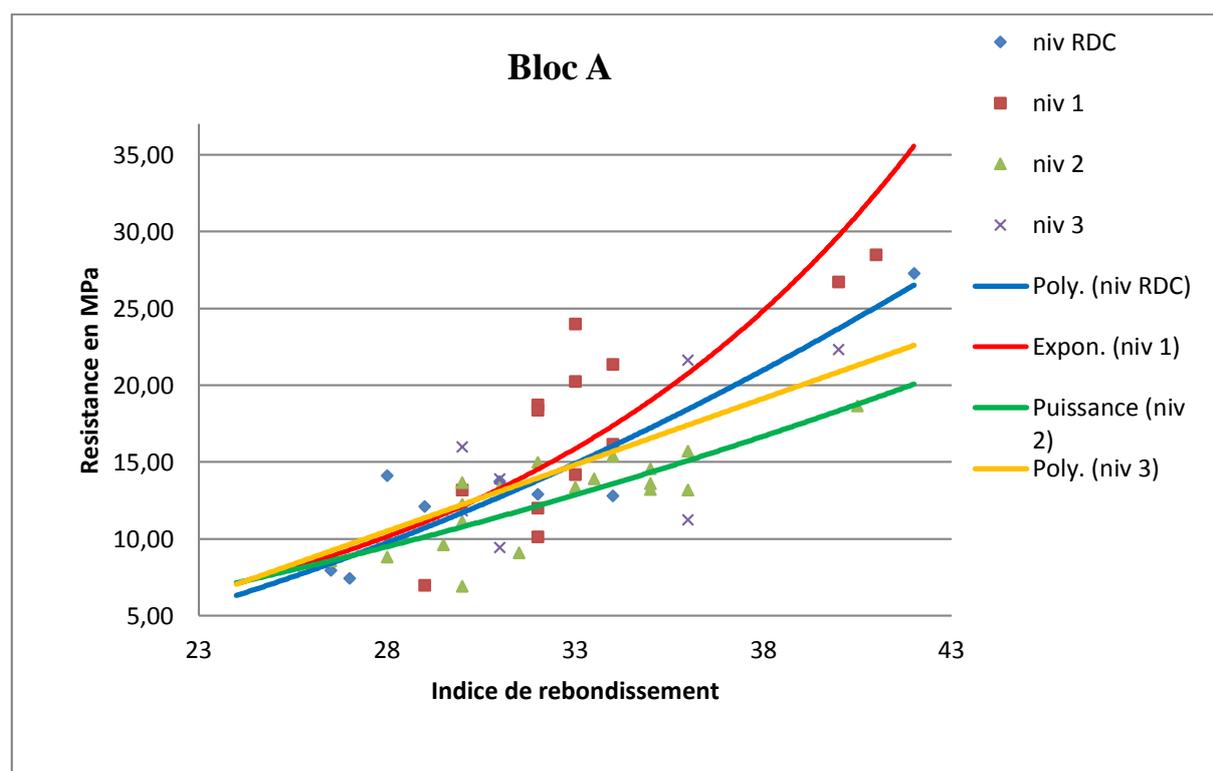


Fig.4.6-Corrélations développées par niveau du bloc A (Poteaux)

D'après la **figure 4.6**, on peut conclure que les corrélations sont faibles pour le niveau 1,2 et 3 ($r = 0.76$; $r = 0.762$ et $r = 0.664$), par contre une bonne relation pour le RDC entre les résistances à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants.

On constate que les résistances varient d'un niveau à un autre suivant cet ordre: Niveau 1 > RDC > Niveau 3 > Niveau 2.

Les conditions de mise en œuvre et les moyens de mise en œuvre (pompe à béton, vibration, etc) peuvent expliquer la plus faible résistance aux niveaux supérieurs.

Des résultats similaires ont été observés pour le bloc B (Fig. 4.7). Les corrélations trouvées pour les deux niveaux de ce bloc sont les suivantes :

| Bloc B | RDC | Niveau 1 |
|-----------|----------------------|----------------------|
| r | 0,688 | 0,549 |
| Equations | $R = 0,121I^{1,425}$ | $R = 0,087I^{1,488}$ |

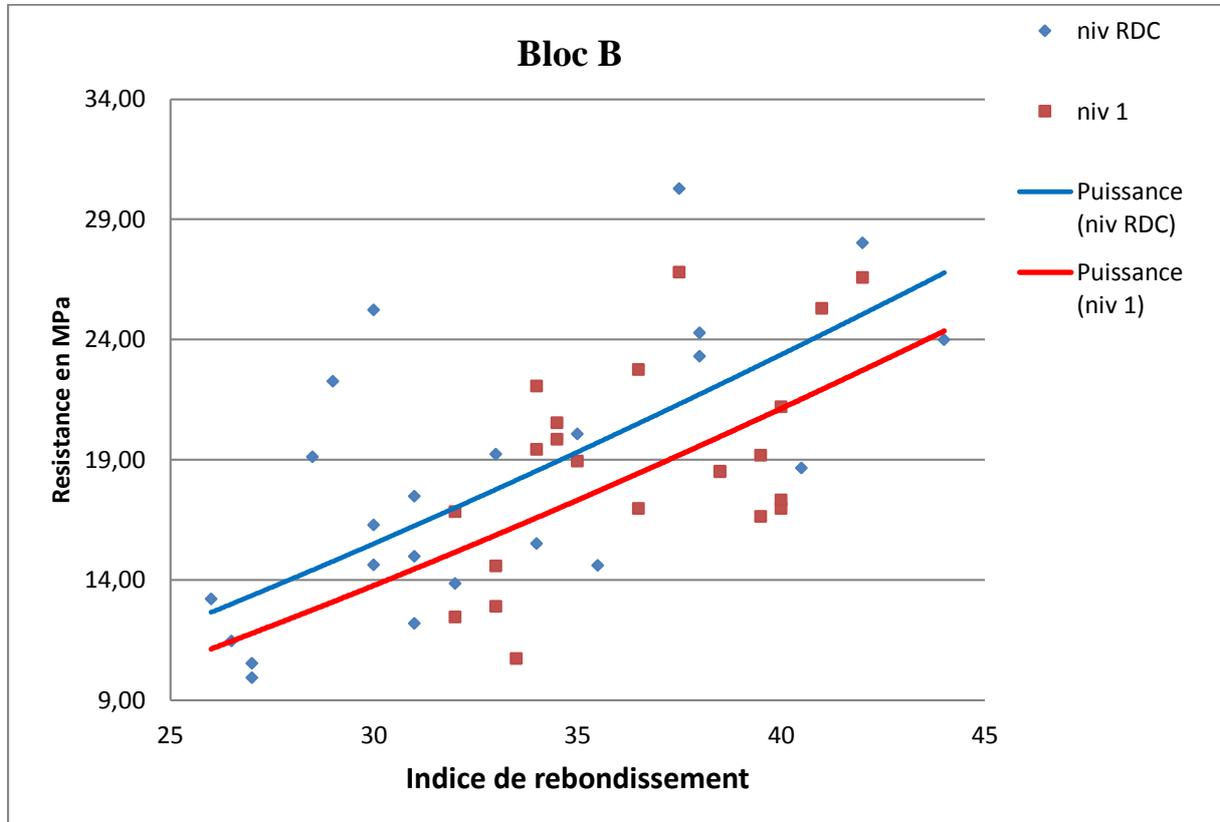


Fig.4.7-Corrélations Développées par Niveau du Bloc B (Poteaux)

D’après la **figure 4.7**, on peut conclure que les corrélations sont faibles ($r = 0.688$; $r = 0.549$). On constate aussi dans la **figure 4.7** que les résistances sont plus élevées pour le RDC que celles du Niveau 1.

Cette variabilité de la résistance dans les différents niveaux des deux blocs est probablement due au coulage non simultané des poteaux ainsi que la différence de mise en œuvre d’un niveau à un autre.

4.6.1.5.3 Corrélation avec les mesures sur carottes correspondantes

La **Figure 4.8** compare les corrélations développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les indices de rebondissement «I» correspondants mesurés sur carottes et éléments. Les expressions proposées à ces corrélations sont les suivantes:

| Objets | Carottes | Poteaux |
|-----------|-------------------------|-------------------------|
| r | 0,586 | 0,737 |
| Equations | $R = 0,082 * I^{1,538}$ | $R = 0,009 * I^{2,112}$ |

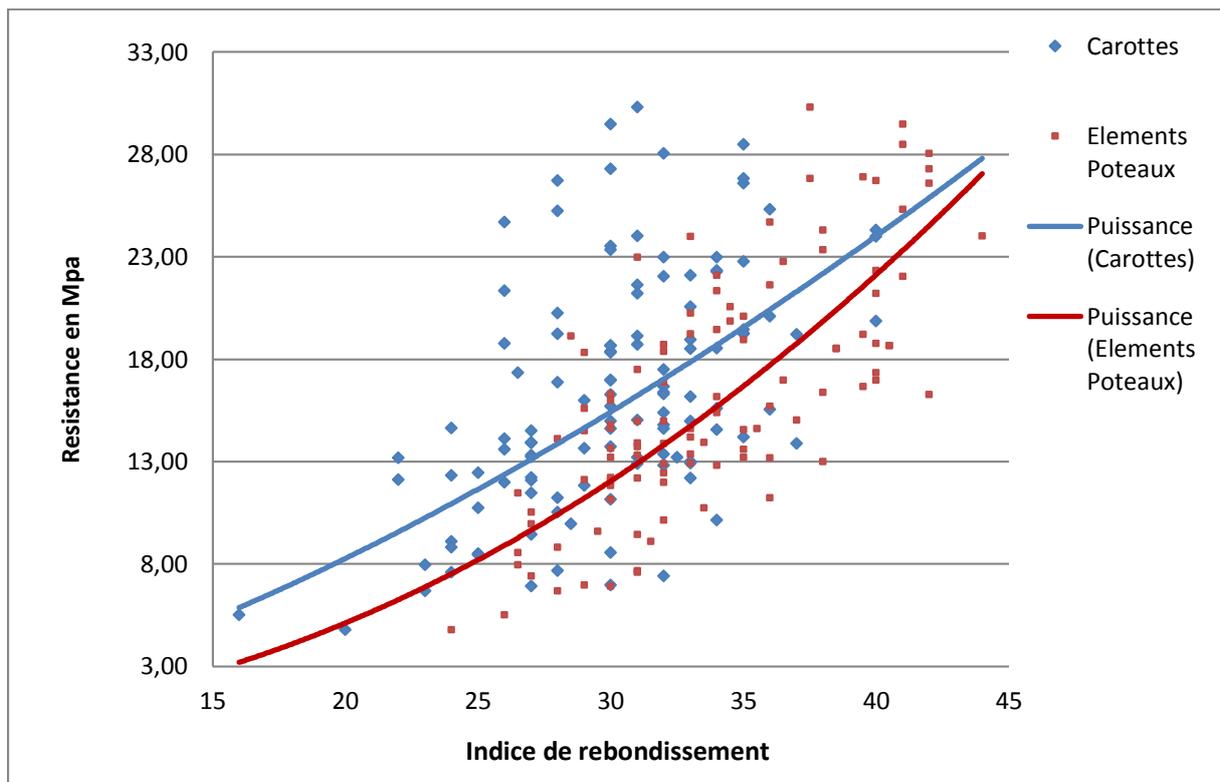


Fig.4.8-Corrélations développées pour poteaux et carottes correspondants

D'après la **figure 4.8**, on peut conclure que les corrélations entre les résistances à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants sont moyennes à faibles ($r = 0.586$; $r = 0.737$). On constate que la résistance estimée par les mesures sur carottes est plus élevée que celle estimée par des mesures sur les poteaux.

4.6.1.6 Corrélations pour les poutres

4.6.1.6.1 Corrélation par bloc

La **Figure 4.9** montre deux courbes de corrélation développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les indices de rebondissement «I» correspondants. Les expressions proposées à ces corrélations sont les suivantes:

| Blocs | A | B |
|-----------|----------------------|----------------------|
| r | 0.716 | 0.658 |
| Equations | $R=2.138e^{0.069*I}$ | $R=3.502e^{0.047*I}$ |

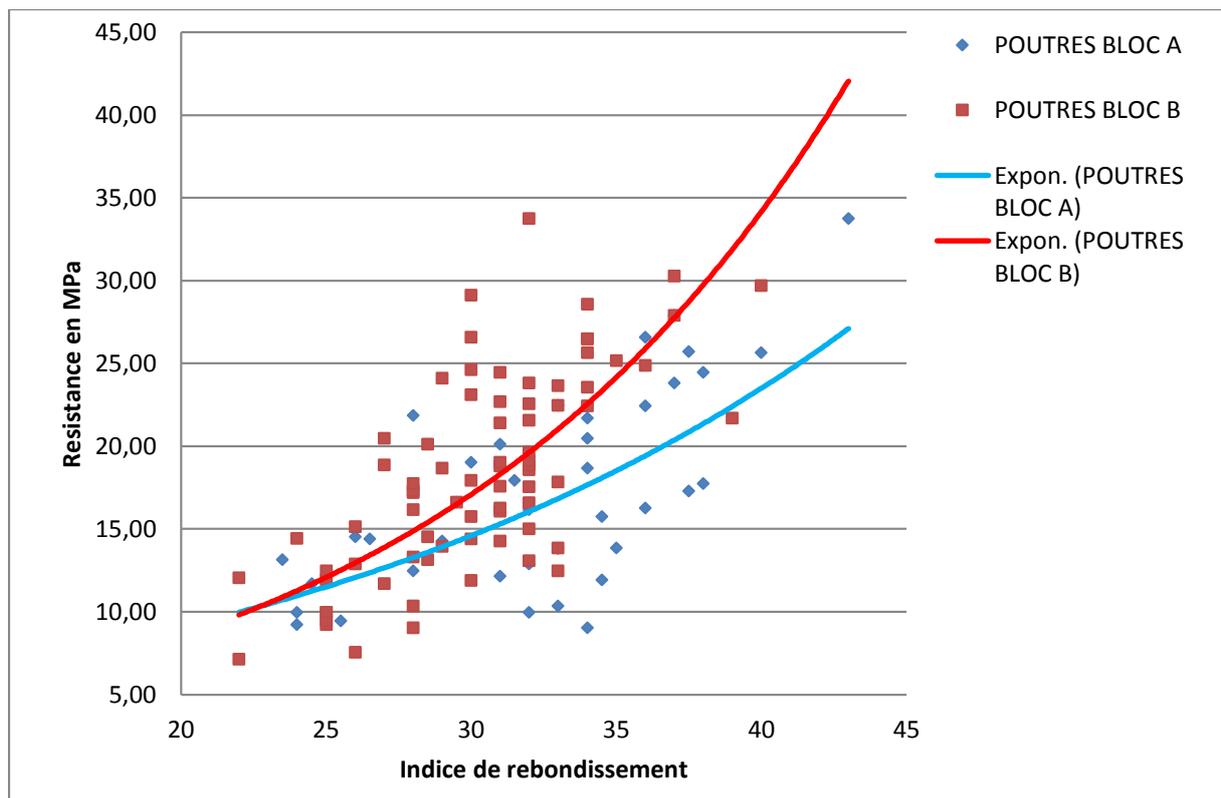


Fig.4.9-Corrélations Développées par Bloc (Poutres)

D'après la **figure 4.9** on peut conclure que les corrélations entre les résistances à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants sont moyennes (**r = 0.716**; **r = 0.658**).

On constate que la résistance dans le bloc B est plus élevée que dans le bloc A probablement due à la différence de mise en œuvre entre les deux blocs.

4.6.1.6.2 Corrélation par niveau

Les **Figures 4.10** et **4.11** montrent les courbes de corrélation développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les indices de rebondissement «I» correspondants pour les différents niveaux. Les expressions proposées à ces corrélations sont les suivantes pour le bloc A:

| Bloc A | RDC | Niveau 1 | Niveau 2 |
|----------|-----------------------|---------------------------------|----------------------|
| R | 0,649 | 0,558 | 0,819 |
| Equation | $R = 1,851e^{0,065I}$ | $R = 0,007I^2 + 0,591I - 12,53$ | $R = 0,018I^{2,007}$ |

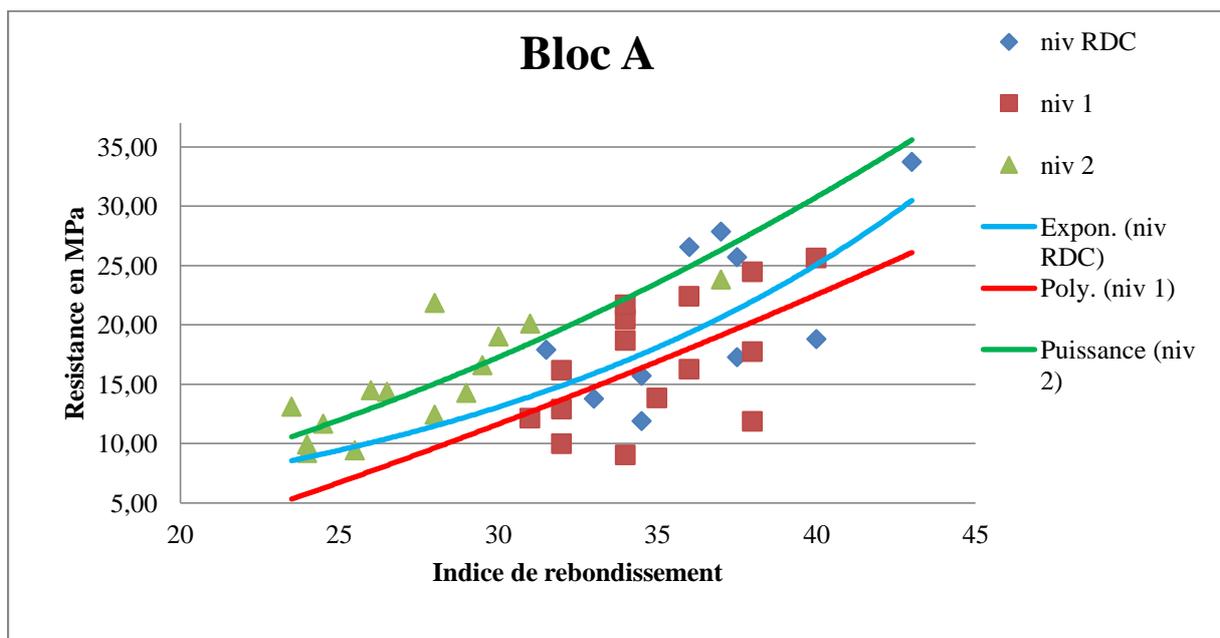


Fig.4.10-Corrélations développées par niveau du bloc A (Poutres)

D'après la **figure 4.10**, on peut conclure que les corrélations entre les résistances à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants pour les poutres sont moyennes à bonne pour tous les niveaux.

La résistance dans le Niveau1 est légèrement inférieure à celle du RDC mais on constate une résistance plus élevée dans le niveau 2 par rapport aux autres niveaux, cette différence est probablement due à l'utilisation d'une pompe à béton pour le coulage du plancher au niveau 2.

Des relations similaires ont été observées pour les poutres du bloc B :

| Bloc B | RDC | Niveau 1 |
|----------|-------------------------|--------------------------|
| R | 0,193 | 0,238 |
| Equation | $R = 0,850 * I^{0,861}$ | $R = 6,417e^{0,034 * I}$ |

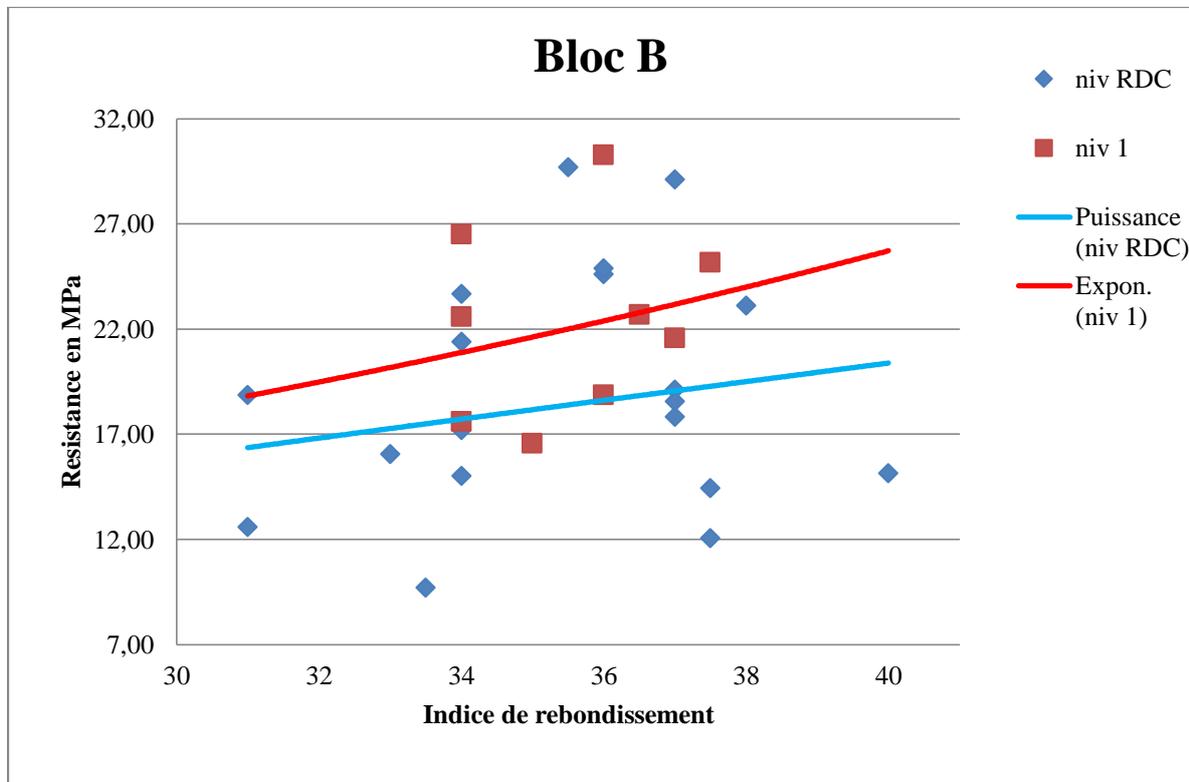


Fig.4.11-Corrélations développées par niveau du bloc B (Poutres)

D’après la **figure 4.11**, on peut conclure que les corrélations entre les résistances à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants des poutres du bloc B sont très faibles ($r = 0.193$; $r = 0.238$ respectivement pour les niveaux RDC et 1). Cette corrélation montre une dispersion très importante des résultats.

4.6.1.6.3 Corrélation avec les mesures sur carottes

La **Figure 4.12** compare les corrélations développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les indices de rebondissement «I» correspondants mesurés sur éléments et carottes correspondantes. Les expressions proposées à ces corrélations sont les suivantes:

| Objets | Carottes | poutres |
|-----------|-------------------------|--------------------------|
| R | 0,608 | 0,725 |
| Equations | $R = 0,054 * I^{1,698}$ | $R = 2,799e^{0,055 * I}$ |

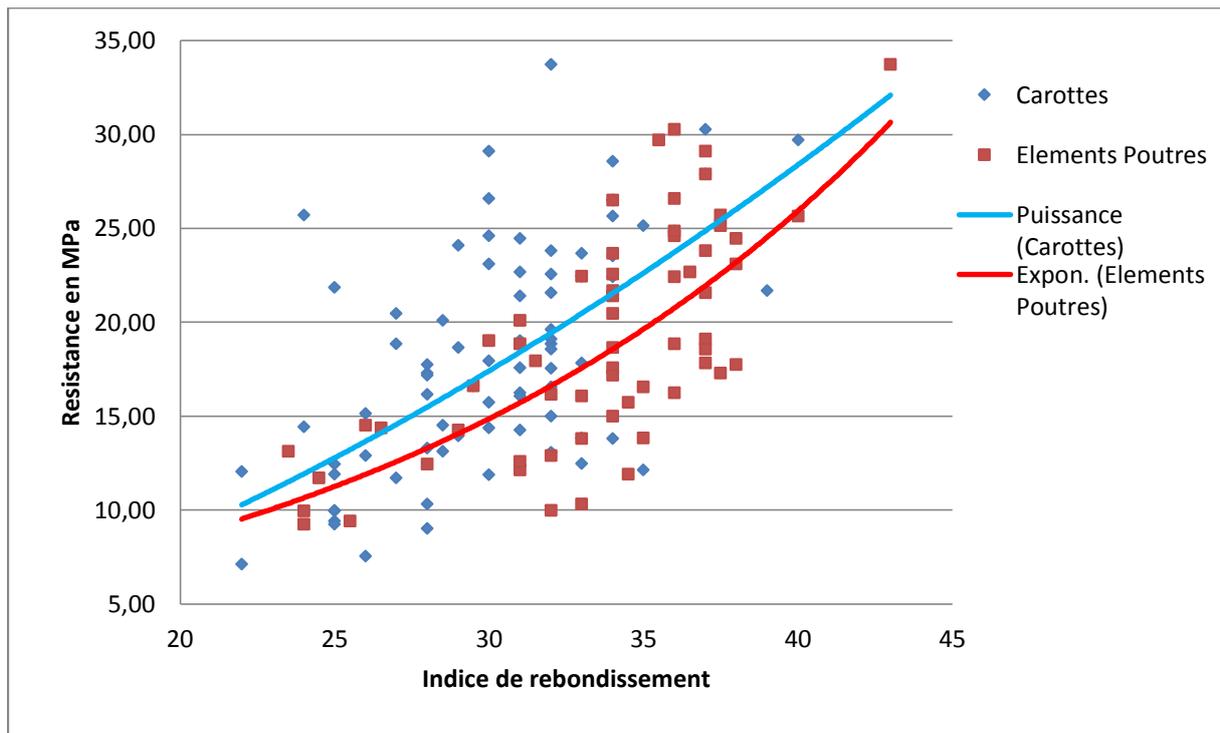


Fig.4.12-Corrélations développées pour les poutres et les carottes correspondantes

D'après la **figure 4.12**, on peut conclure que les corrélations sont moyennes ($r = 0.608$; $r = 0.725$) entre les résistances à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants.

On constate que la résistance estimée est plus élevée pour les mesures sclérométriques sur carottes que pour mesures sur les poutres.

4.6.3.4 Etude comparative aux autres modèles

Différents chercheurs ont proposés des corrélations établies pour l'ensemble des différents bétons conservés à l'air libre d'un climat chaud.

Qasrawi [24] a élaboré une corrélation linéaire de l'équation (4.3) avec un coefficient de corrélation $r = 0.938$. Cette corrélation rassemblant différents bétons prélevés sur divers sites, fabriqués selon des modes inconnus et conservés sous des conditions de site

$$R = 1.353 I - 17.393 \dots \dots \dots (4.3)$$

Avec : R en MPa.

Une autre corrélation sous forme linéaire (Eq. 4.4) d'un coefficient de corrélation $r = 0.962$ et une erreur type $s = 2.333 \text{ MPa}$ a été développée par Hobbs et Kebir [30]. Une variation triparamétrique (E/C, degré de serrage et type de coffrage) a été choisie dans la fabrication des bétons à étudier. Les rapports E/C utilisés sont: 0.5, 0.6 et 0.7 et trois types de serrage (suffisant, moyen et nul) ont été appliqués. Le coffrage utilisé était de deux types: en bois et en plastic dur. Les différents bétons en question sont conservés dans des conditions sèches sous une température de 20°C .

$$R = 2.168 I - 27.747 \dots \dots \dots (4.4)$$

Avec : R en MPa.

L'abaque fourni avec l'appareil [31] a été élaboré sous forme de tableau d'où résulte une relation polynomiale (Eq. 4.5), avec un coefficient de corrélation $r = 0.999$, valable pour 14 à 56 jours d'âge. Cet abaque est souvent utilisé par de nombreux organismes de contrôle du béton.

$$R = 0.011 I^2 + 0.902 I - 12.870 \dots \dots \dots (4.5)$$

Avec : R en MPa.

La corrélation proposée par K. ALI BENYAHIA [2] entre la résistance à l'écrasement des spécimens conservés à l'air libre sur chantier et les indices de rebondissement «I» correspondants effectués sur des éléments d'ouvrages. Cette corrélation rassemblant les différents types de bétons prélevés sur divers sites et examinés à différents âges.

L'expression analytique proposée à cette corrélation est une fonction de forme puissance présentée par l'équation (4.6) avec un coefficient de corrélation $r = 0.925$ et une erreur type $s = 2.508$ MPa.

$$R = 0.011 I^{2.136} \dots\dots\dots (4.6)$$

La **figure 4.13** montre une comparaison entre les corrélations trouvées dans notre étude (Eq. 4.1 et 4.2) et les modèles donnés par les équations: (4.3), (4.4), (4.5) et (4,6) développées par d'autres chercheurs.

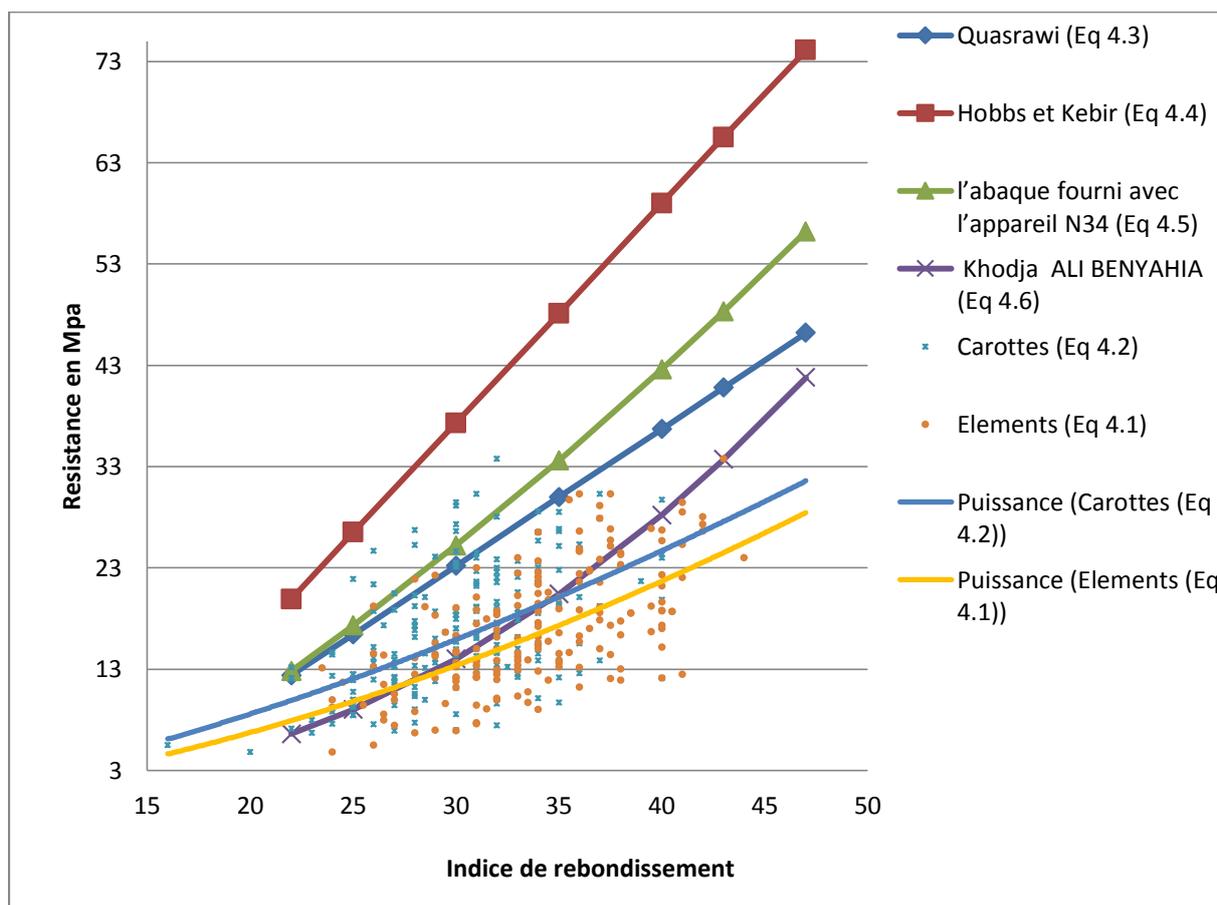


Fig.4.13- Comparaison des corrélations obtenues avec celles d'autres chercheurs

De la **figure 4.13** on note que l'estimation de la résistance par des mesures sur éléments sous-estime légèrement la résistance en comparaison à l'estimation par des mesures sur les carottes eux-mêmes.

Tous les modèles proposés surestiment la résistance car l'estimation est basée sur des éprouvettes et sur des bétons de classes de résistances différentes avec des matériaux et compositions différents de ceux utilisés dans les chantiers algériens.

La corrélation 4.6 développée sur des bétons similaires sur des éléments structuraux dans la région du centre algérien est celle qui donne une estimation la plus proche au modèle de cette étude. Ceci montre clairement la nécessité de développer des relations basées sur les matériaux locaux et tenant compte des conditions de mise en œuvre et de l'environnement local.

L'utilisation des abaques de l'appareil (Eq. 4.5), qui est souvent le cas sur nos chantiers, surestime la résistance et par conséquent présente un risque dans le cas d'évaluation post sismique ou changement d'usage.

4.6.2 Corrélations entre vitesses ultrasonique et la résistance

4.6.2.1 Corrélations globales de tous les éléments de la structure

La **Figure 4.14** montre une courbe de corrélation développée entre les résistances à la compression par écrasement «R» et la vitesse Ultrasonique «V» correspondante.

L'expression proposée à cette corrélation est une fonction de forme puissance présentée par l'équation (4.7) avec un coefficient de corrélation moyen **r = 0.688**

$$R = 0,455 * V^{2,753} \dots\dots\dots L'équation (4.7)$$

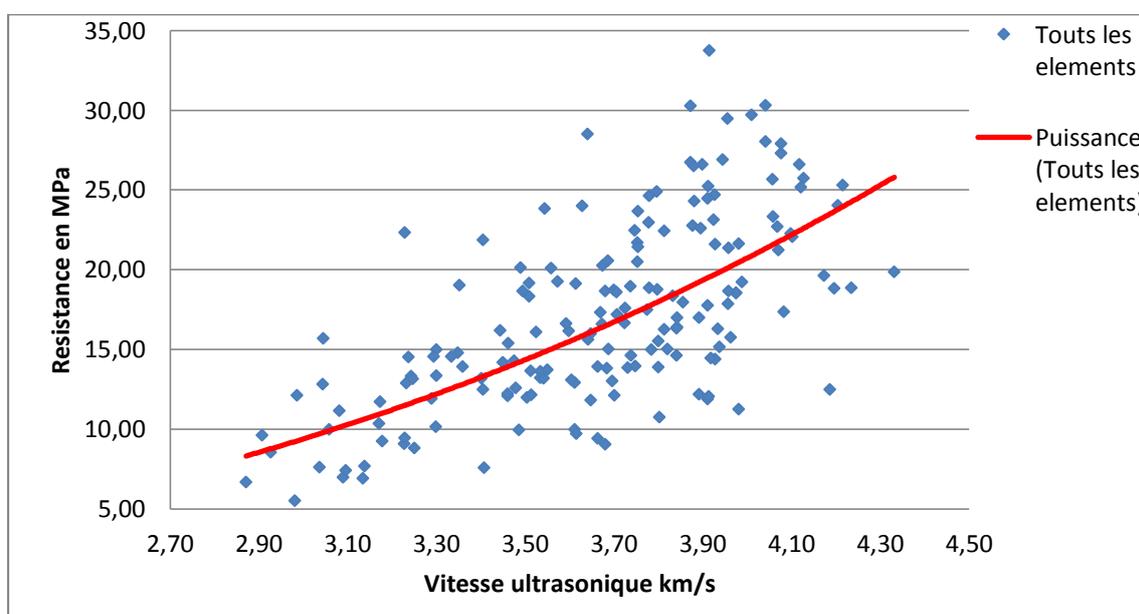


Fig.4.14-Corrélation développée sur tous les éléments

Des résultats de corrélation similaires ont été trouvés par d'autres chercheurs Algérien en effectuant des études sur des bétons de la région de Médéa, Blida et Chlef [2] [39] [40].

4.6.2.2 Corrélations tous les éléments par bloc

La **Figure 4.15** compare les corrélations développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les vitesses Ultrasoniques «V» correspondantes des deux blocs A et B.

Les expressions proposées à cette corrélation sont les suivantes:

| Blocs | Bloc A | Bloc B |
|-----------|-------------------------|-------------------------|
| r | 0,69 | 0,447 |
| Equations | $R = 0,409 * V^{2,839}$ | $R = 0,815 * V^{2,322}$ |

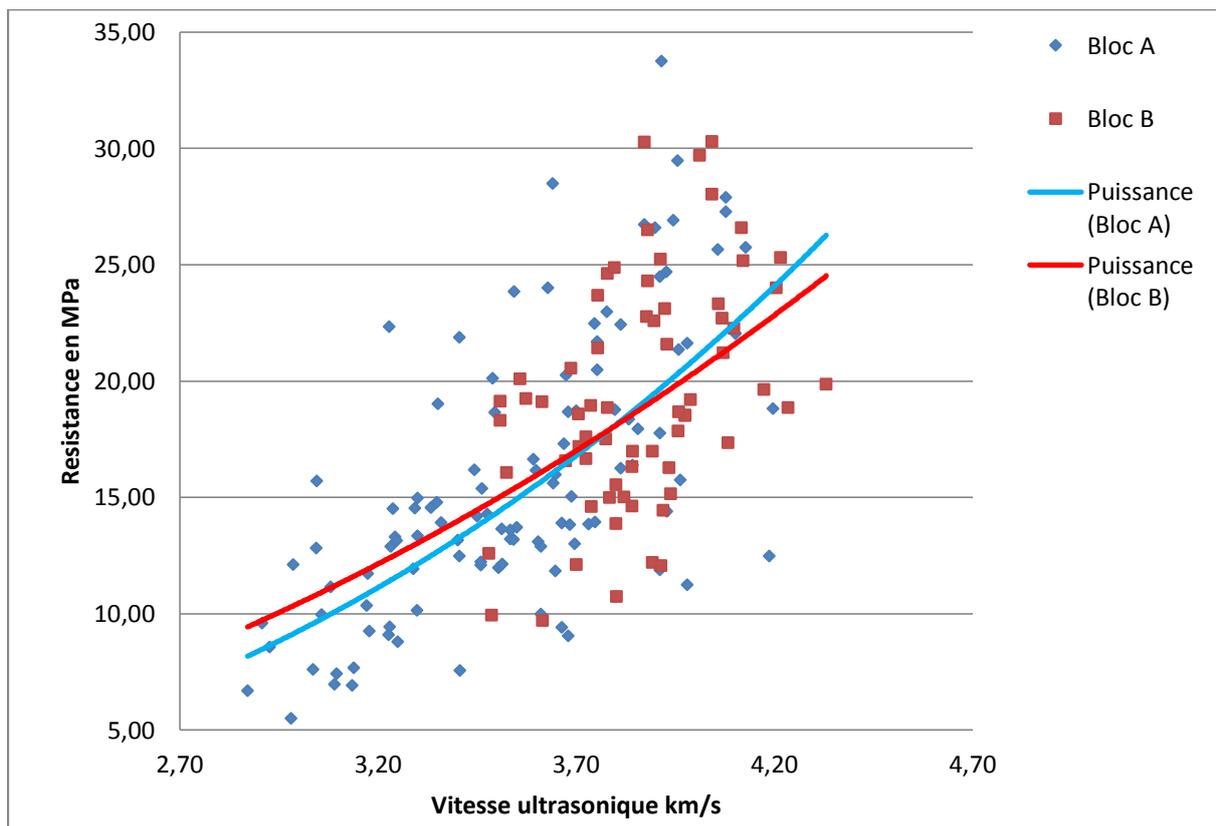


Fig.4.15-Corrélations Développées Par Blocs

D'après la **figure 4.15**, on peut conclure que les deux corrélations sont moyennes à faibles ($r = 0.69$ et $r = 0.447$) et que la résistance estimée pour les deux blocs est très similaire.

4.6.2.3 Corrélations tous les éléments avec les carottes correspondantes

La **Figure 4.16** compare les corrélations développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les vitesses Ultrasoniques «V» correspondantes pour les mesures sur éléments et les mesures sur des carottes.

L'expression proposée pour les carottes est une fonction de forme puissance présentée par l'équation (4.8) avec un coefficient de corrélation moyen $r=0,55$

$$R = 1,233e^{0,66*V} \dots\dots\dots \text{l'équation (4.8)}$$

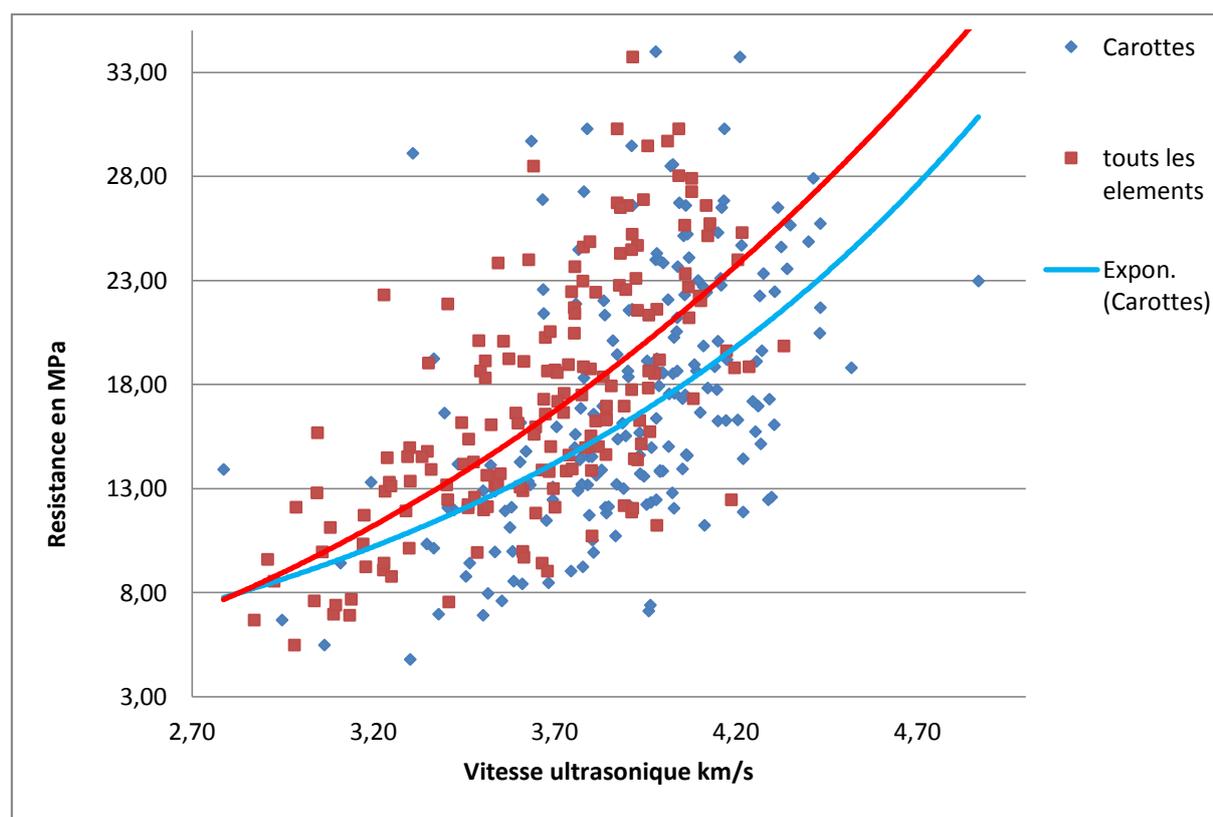


Fig.4.16-Corrélations Développées pour Eléments et Carottes

On constate que la résistance estimée par les essais ultrasoniques sur éléments est plus élevée que la résistance estimée par des mesures ultrasoniques sur carottes et ce contrairement à ce qui a été trouvé pour les essais sclérométriques. Les mesures sur éléments sont affectées par l'état de la surface des éléments contrairement aux carottes bien sciées et surfacées. La présence de microfissures l'effet de carottage diminue la vitesse ultrasonique sur les carottes.

4.6.2.4 Comparaison des corrélations pour poteaux et pour poutres

La **Figure 4.17** les corrélations développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les vitesses Ultrasoniques «V» correspondantes pour les poteaux et pour les poutres. Les expressions proposées pour ces deux corrélations sont les suivantes:

| Eléments | Poteaux | Poutres |
|-----------|-------------------------|-------------------------|
| r | 0,715 | 0,773 |
| Equations | $R = 0,281 * V^{3,138}$ | $R = 0,342 * V^{2,963}$ |

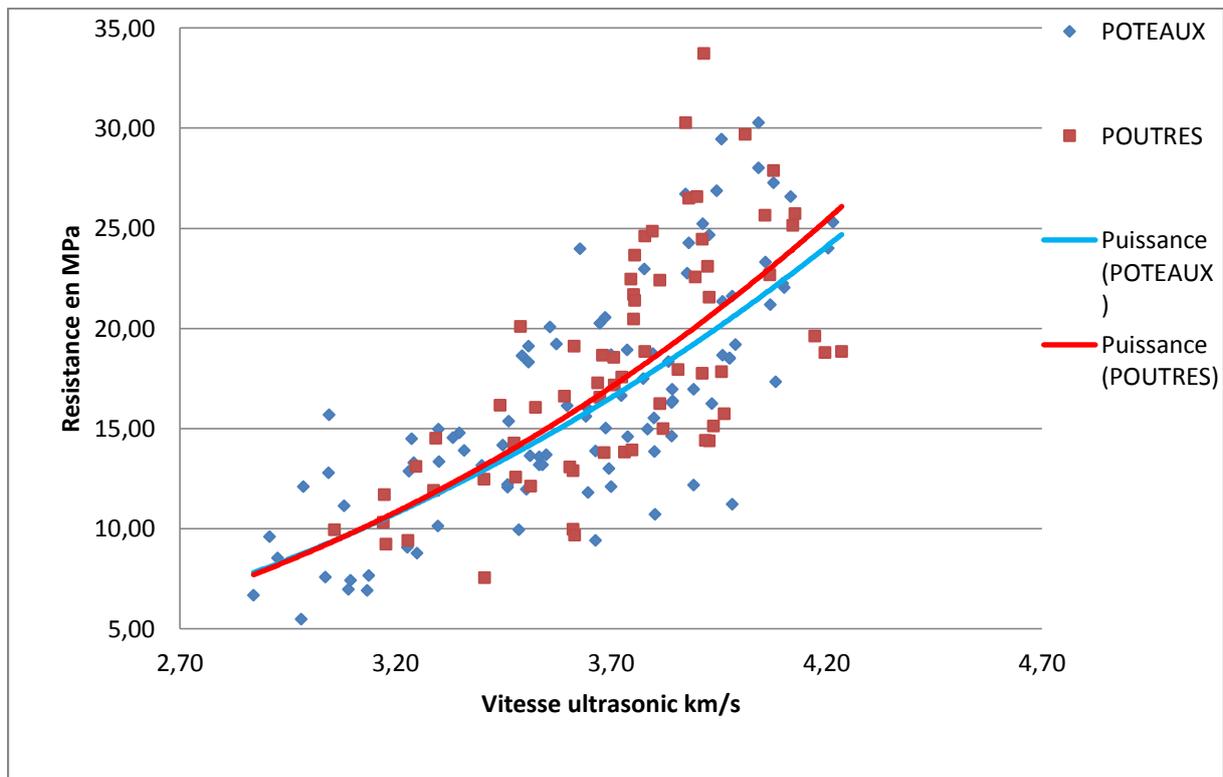


Fig.4.17-Corrélations développées pour poteaux et poutres

D'après la **figure 4.17**, montre des corrélations moyennes ($r = 0.715$ et $r = 0.773$).

On constate que les résistances estimées par les mesures ultrasoniques pour les Poutres sont légèrement supérieures à celles des Poteaux.

4.6.2.5 Corrélations pour poteaux seuls

4.6.2.5.1 Corrélation par bloc

La **Figure 4.18** montre deux courbes de corrélation développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les vitesses Ultrasonique «V» correspondantes pour les poteaux des blocs A et B séparément. Les expressions proposées à cette corrélation sont les suivantes:

| Blocs | A | B |
|-----------|-------------------------|--------------------------|
| r | 0,745 | 0,541 |
| Equations | $R = 0,290 * V^{3,123}$ | $R = 1,030e^{0,747 * V}$ |

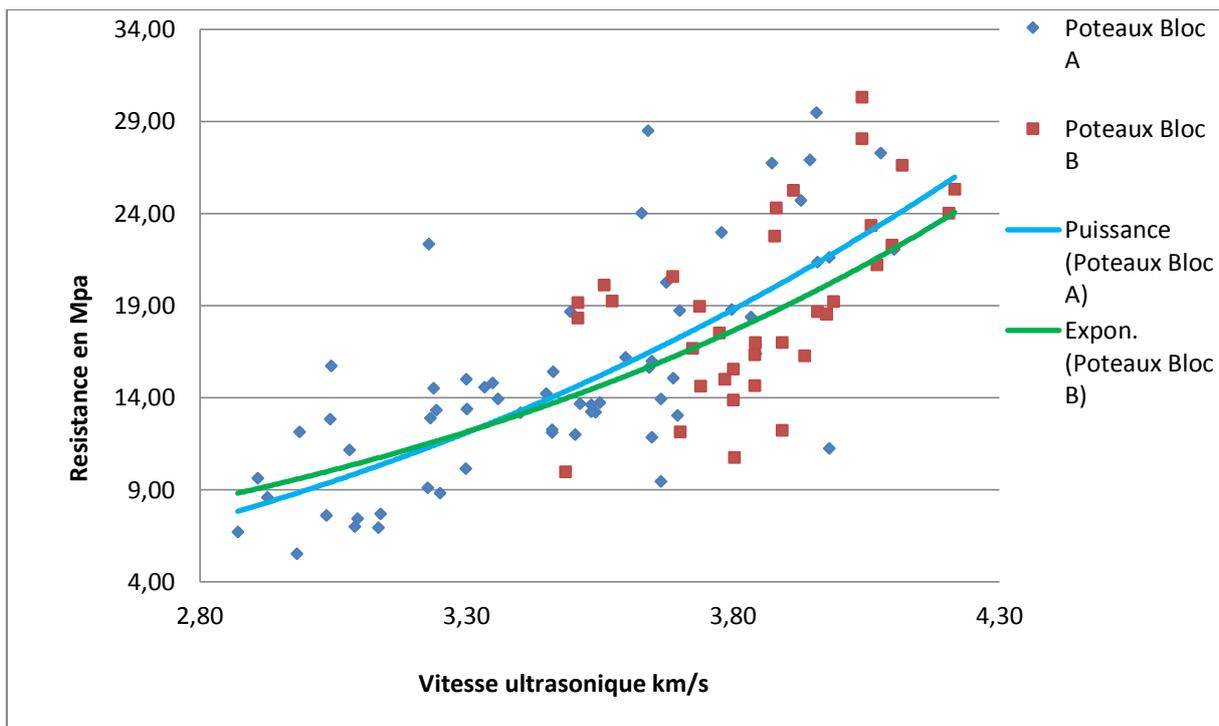


Fig.4.18-Corrélations développées par bloc (Poteaux)

D’après la **figure 4.18**, montre que les relations sont faibles ($r = 0.745$ et $r = 0.541$) entre les résistances à la compression par écrasement et les vitesses Ultrasonique correspondantes.

On constate que les deux courbes sont presque similaire avec une résistance légèrement supérieure pour le bloc A.

4.6.2.5.2 Corrélation par niveau

Les **Figures 4.19 et 4.20** comparent les corrélations développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les vitesses Ultrasonique «V» correspondantes par niveau.

Les expressions proposées à ces corrélations sont les suivantes:

| Bloc A | RDC | 1 ^{er} étage | 2 ^{ème} étage | 3 ^{ème} étage |
|-----------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| r | 0,882 | 0,773 | 0,831 | 0,759 |
| Equations | $R = 0,156 * V^{3,660}$ | $R = 0,158 e^{1,273 * V}$ | $R = 10,89 * V^2 - 58,87 * V + 87,93$ | $R = 0,032 e^{1,632 * V}$ |

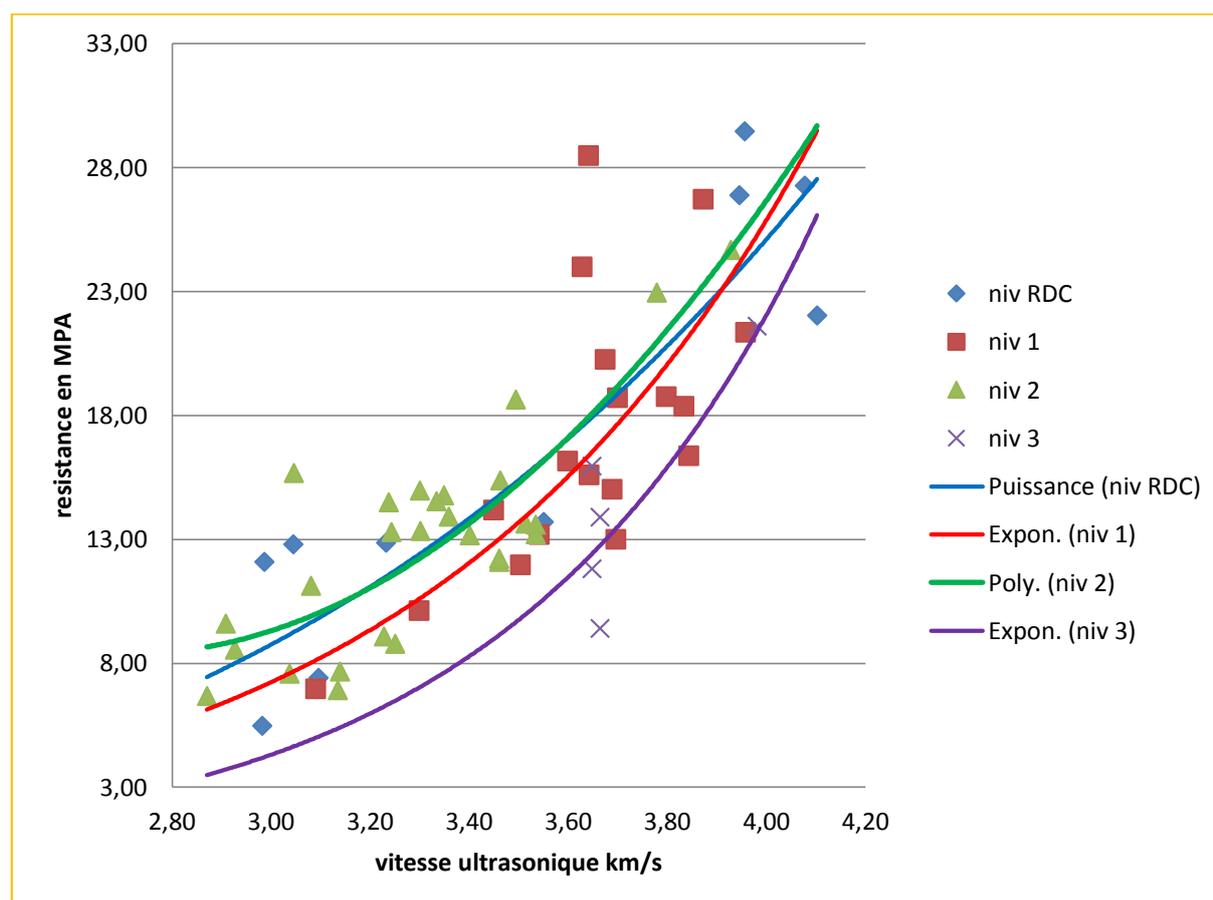


Fig.4.19-Corrélations développées par niveau du bloc A (Poteaux)

Les corrélations développées pour les poteaux par niveau sont assez bonnes et le coefficient de corrélations est meilleur que celui développé pour tous les poteaux ou pour un bloc complet. On remarque aussi que la résistance ne varie que légèrement entre les niveaux 1, 2 et RDC ; contrairement au niveau 3 où la résistance est plus faible par rapport aux autres niveaux.

Des corrélations similaires ont été proposées pour le bloc B (Fig. 4.20).

| Bloc B | RDC | 1 ^{er} étage |
|-----------|---------------------------------------|----------------------------|
| r | 0,636 | 0,547 |
| Equations | $R = 25,82 * V^2 - 180,1 * V + 328,9$ | $R = 46,76 \ln(V) - 45,15$ |

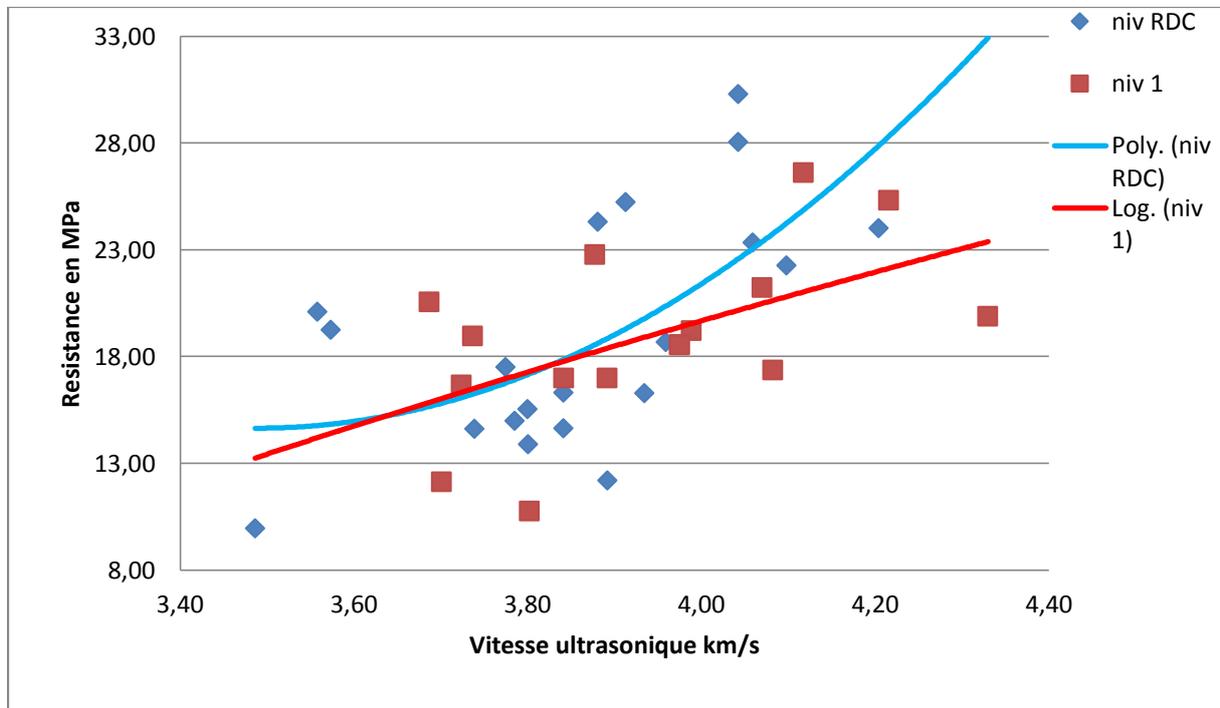


Fig.4.20-Corrélations développées par niveau du bloc B (Poteaux)

Les corrélations développées présentent un coefficient de corrélation assez faible ($r = 0.636$; $r = 0.547$).

Les résistances sont plus élevées pour le RDC que celles du Niveau 1.

Cette variabilité de la résistance dans les différents niveaux des deux blocs est probablement dû au coulage plus facile par des moyens manuels que dans le niveau supérieur.

4.6.2.5.3 Comparaison des corrélations poteaux et carottes

La **Figure 4.21** compare les corrélations développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les vitesses ultrasoniques correspondantes mesurées sur les poteaux ou sur les carottes extraites de ces poteaux. Les expressions proposées à ces corrélations sont les suivantes :

| Objets | Carottes | Poteaux |
|-----------|-------------------------|-------------------------|
| r | 0,652 | 0,773 |
| Equations | $R = 0,189 * V^{3,268}$ | $R = 0,342 * V^{2,963}$ |

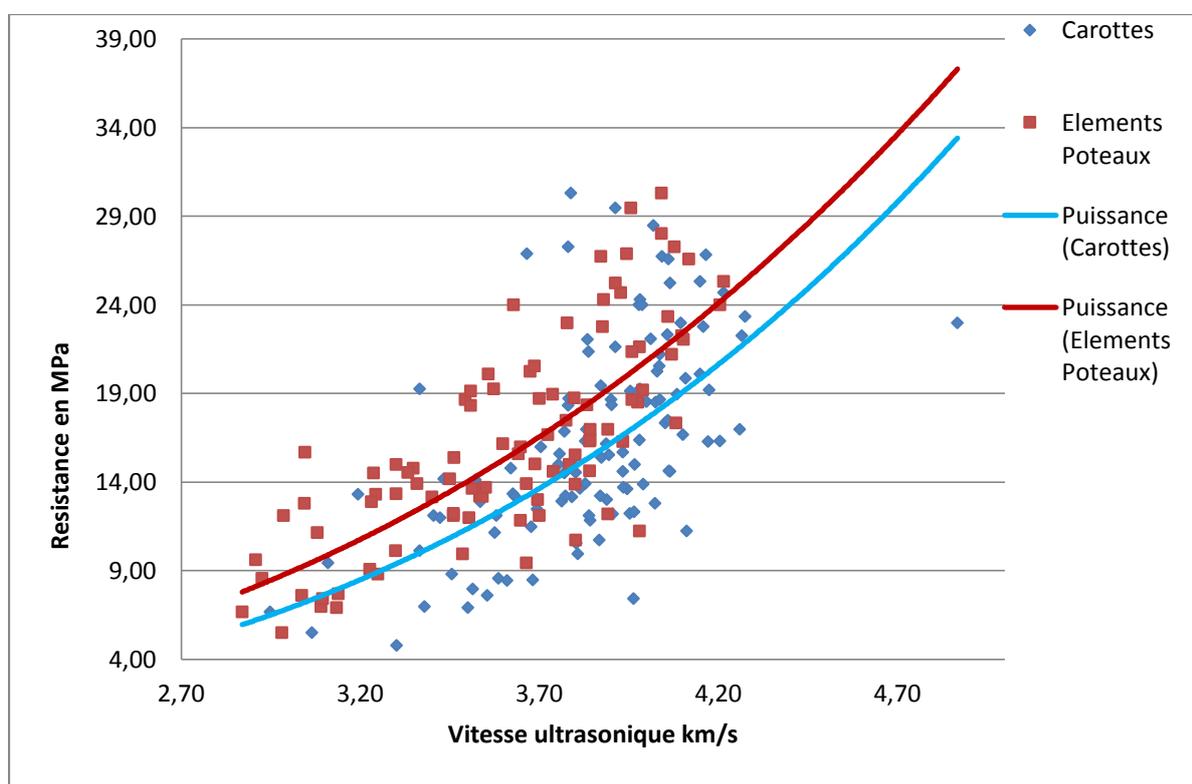


Fig.4.21-Corrélations développées pour poteaux et carottes

Les coefficients de corrélations trouvés pour ces corrélations sont moyens ($r = 0.652$; $r = 0.773$).

On constate que la résistance estimée par les essais ultrasoniques sur poteaux est plus élevée que celle estimée à partir des mesures ultrasoniques sur carottes. La longueur de propagation

plus élevée pour les poteaux (35 cm) que pour les carottes (<15 cm), l'effet de carottage endommageant les carottes peuvent être les raisons probables de cette différence.

4.6.2.6 Corrélations pour poutres

4.6.2.6.1 Corrélation par bloc

La **Figure 4.22** montre les corrélations trouvées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les vitesses Ultrasonique «V» correspondantes pour les poutres des deux blocs A et B. Les expressions proposées à ces corrélations sont les suivantes:

| Blocs | A | B |
|-----------|------------------------|-----------------------|
| r | 0,618 | 0,604 |
| Equations | $R = 1,020e^{0,754*V}$ | $R = 0,454*V^{2,656}$ |

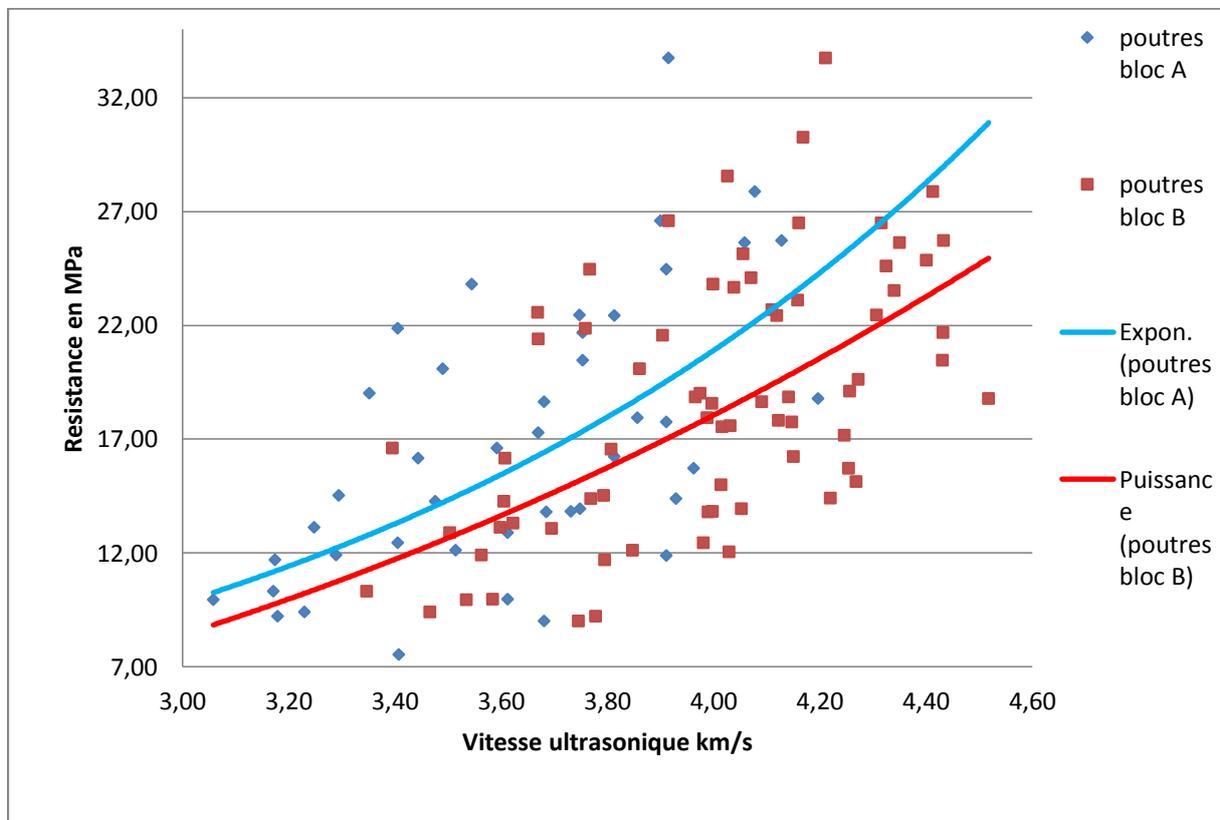


Fig.4.22-Corrélations développées par bloc (Poutres)

Les coefficients de corrélations entre les résistances à la compression par écrasement et les vitesses Ultrasonique correspondantes pour les poutres des deux blocs sont moyens (**r = 0.618**;

$r = 0.604$). On constate aussi que la résistance estimée dans le bloc A est plus élevée que celle dans le bloc B.

4.6.2.6.2 Corrélation par niveau

Les **Figure 4.23 et 4.24** montrent les courbes de corrélation développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les vitesses Ultrasonique «V» correspondantes des poutres par niveau. Les expressions proposées à ces corrélations sont les suivantes:

| Bloc A | RDC | 1 ^{er} étage | 2 ^{ème} étage |
|-----------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| r | 0,653 | 0,648 | 0,788 |
| Equations | $R = 0,245 * V^{3,236}$ | $R = 4,955 * V^2 - 16,02 * V + 7,370$ | $R = 0,027 * V^{5,198}$ |

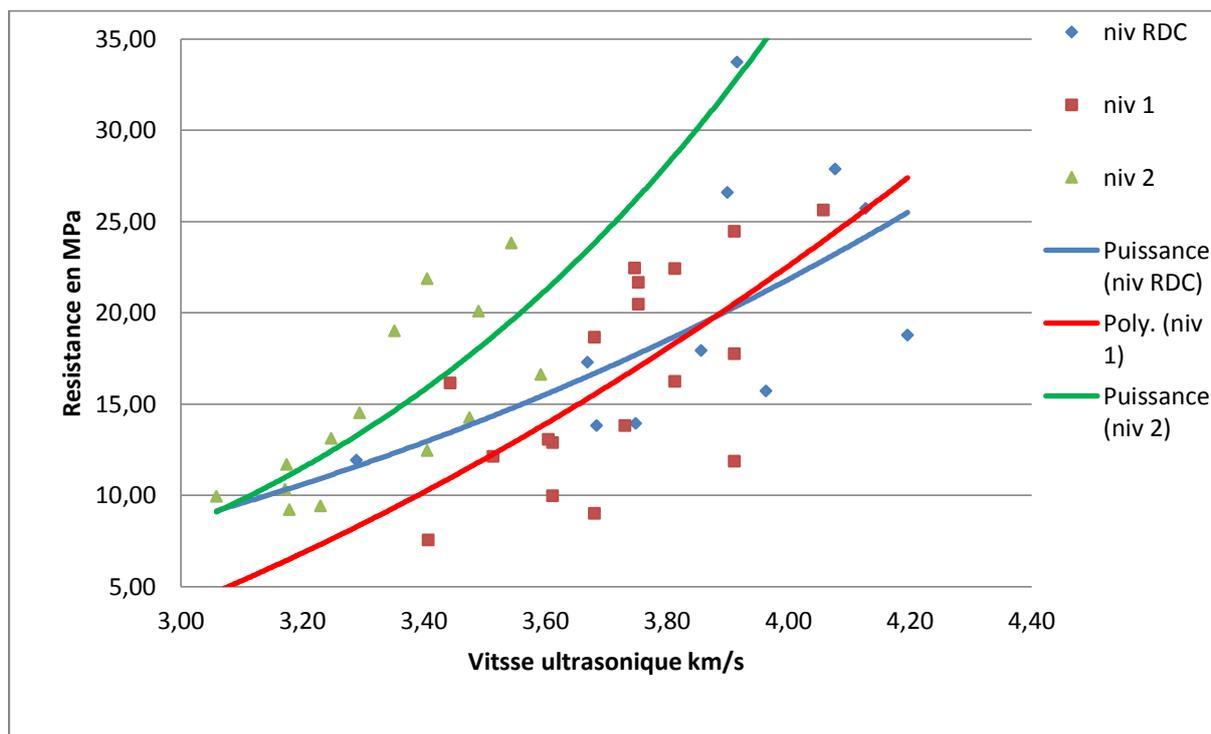


Fig.4.23-Corrélations développées par niveau du bloc A (Poutres)

Les coefficients de corrélations pour les différents niveaux sont similaires (allant de 0,65 à 0,79) et par conséquent meilleure que ceux trouvés par bloc (de l'ordre de 0.61). La variabilité par niveau est moins importante que par bloc. Les poutres d'un niveau sont généralement coulées dans une seule journée et les poteaux en une ou deux journées en comparaison à plusieurs journées espacées dans le temps pour les blocs.

On constate que les résistances estimées pour le niveau 2 sont plus élevées par rapport aux autres niveaux.

Des corrélations similaires ont été trouvées pour le bloc B que le bloc A (Fig. 4.24).

Cependant, les coefficients de corrélations trouvés pour le bloc B sont plus faibles ($r = 0.33$ pour le Rdc et $r=0.598$) pour le niveau 1).

La résistance estimée pour le niveau 1 est supérieure à celle estimée pour le niveau Rdc.

| Bloc B | RDC | 1 ^{er} étage |
|-----------|------------------------|-----------------------|
| r | 0,33 | 0,598 |
| Equations | $R = 0,842e^{0,796*V}$ | $R = 0,336*V^{3,092}$ |

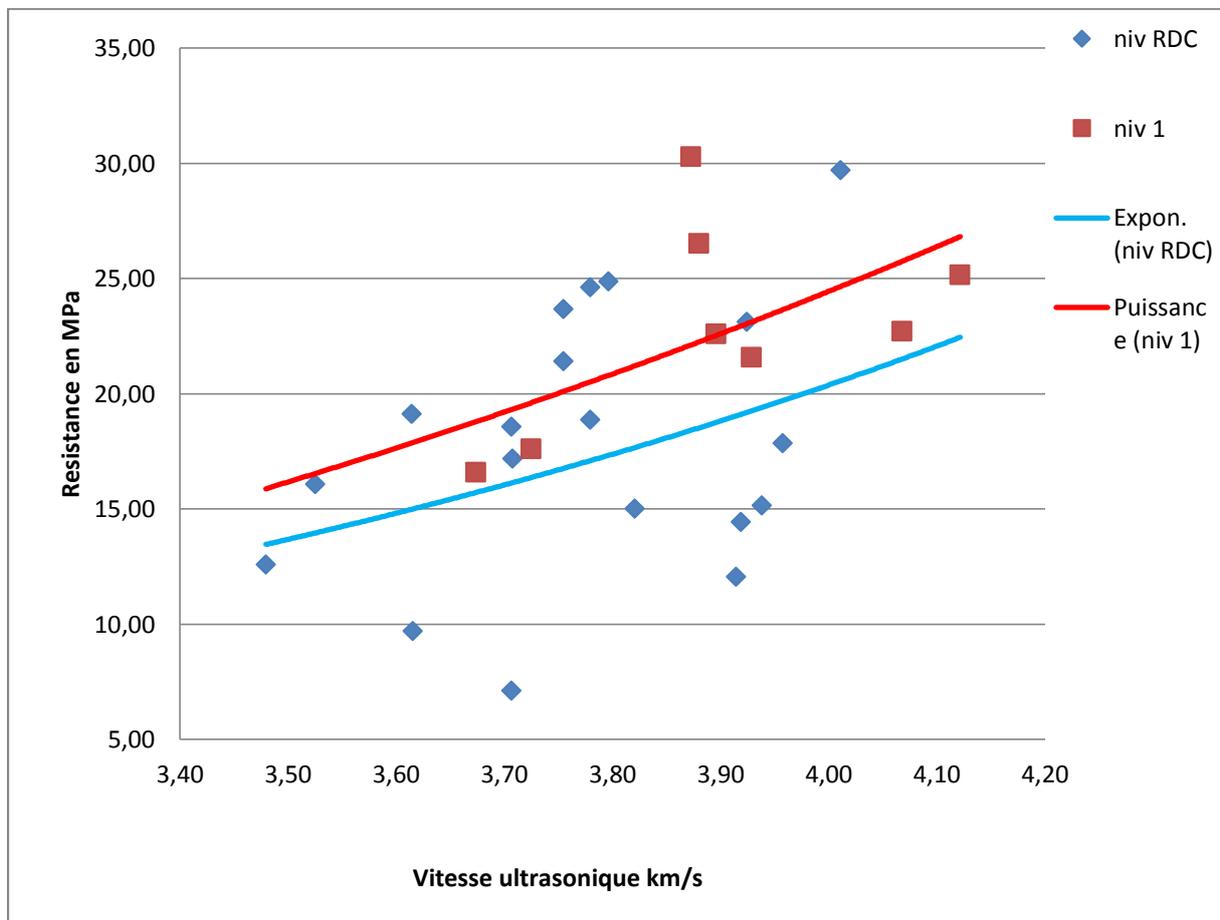


Fig.4.24-Corrélations développées par niveau du bloc B (Poutres)

4.6.2.6.3 Comparaison des corrélations poutres et Carottes

La comparaison des vitesses ultrasoniques mesurées sur poutres et celles mesurées sur les carottes extraites de ces poutres sont résumés dans la **Figure 4.25**. Les expressions proposées à ces corrélations sont les suivantes:

| Objets | Carottes | Poutres |
|-----------|-------------------------|-------------------------|
| r | 0,52 | 0,715 |
| Equations | $R = 0,749 * V^{2,274}$ | $R = 0,281 * V^{3,138}$ |

Les coefficients de corrélations sont moyens à élever ($r = 0.52$; $r = 0.715$).

La résistance estimée sur la base de mesures ultrasoniques sur poutres est plus élevée que celle estimée par les mesures ultrasonique sur carottes. Ceci confirme la tendance observée dans le cas des poteaux. L'effet de l'opération de carottage, le sens de carottages, la différence dans longueur de mesure explique partiellement cette différence.

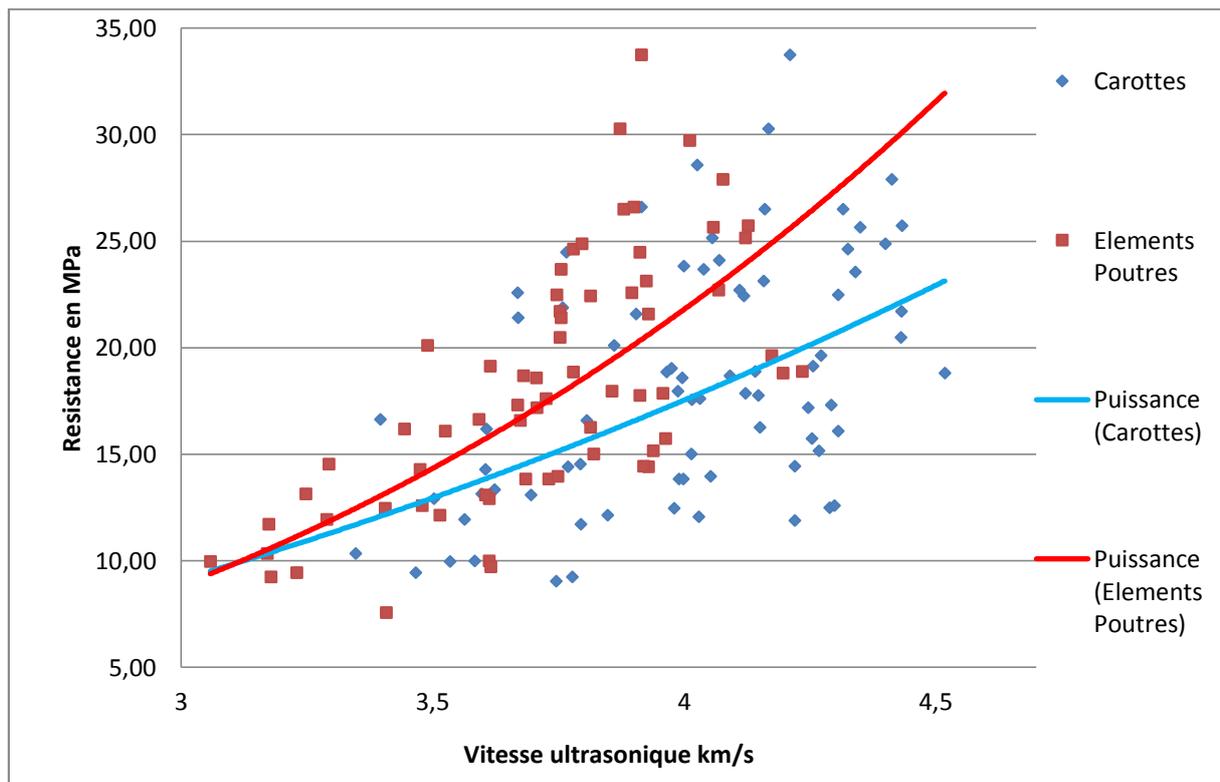


Fig.4.25-Corrélations développées pour poutres et carottes

4.6.2.4 Etude comparative avec les autres modèles

Différents chercheurs ont proposés d'autres corrélations pour des bétons fabriqués au laboratoire ou sur site.

Hobbs et Kebir. [30] proposant une relation polynomiale (Eq. 4.9) d'un coefficient de corrélation $r = 0.950$ et un écart type $s = 2.716 \text{ MPa}$

$$R = 12.289 V^2 - 49.024 V + 24.271 \dots \dots \dots (4.9)$$

Avec : R en MPa & V en km /s.

Dreux et Festa [32] ont développé une relation sous forme graphique d'où résulte une relation exponentielle (Eq. 4.10), avec un coefficient de corrélation $r = 0.999$. Cette courbe est souvent utilisée par de nombreux organismes de contrôle du béton.

$$R = 0.051 \exp (1.487 V) \dots \dots \dots (4.10)$$

Avec : R en MPa & V en km /s.

K. ALI BENYAHIA [2] a effectué des corrélations entre les résistances à la compression « R » par écrasement des spécimens conservés à l'air libre sur chantier et les vitesses ultrasoniques « V » correspondantes effectuées sur des éléments d'ouvrages.

L'expression analytique proposée à cette corrélation est une fonction de forme exponentielle présentée par l'équation (4.11) avec un coefficient de corrélation $r = 0.966$.

$$R = 0.232 \exp (1.117 V) \dots \dots \dots (4.11)$$

Avec : R en MPa & V en km /s.

La **figure 4.26** montre une comparaison entre les deux corrélations proposées dans cette étude (Eq. 4.7 et 4.8) et les modèles proposés par d'autres chercheurs: (4.9), (4.10), et (4,11).

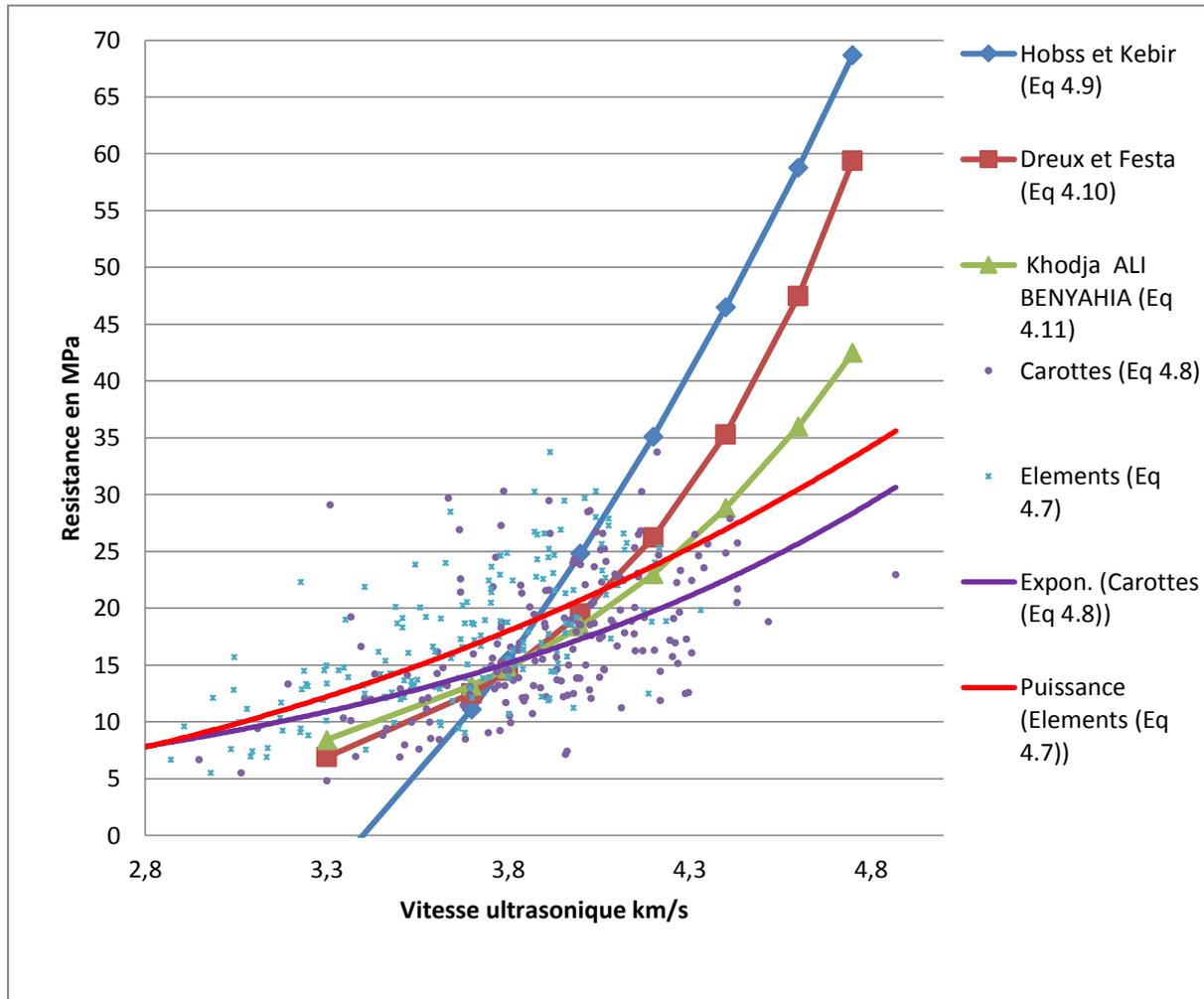


Fig.4.26- Comparaison des corrélations obtenues avec celles d'autres chercheurs

Pour les vitesses faibles (càd résistances faibles), les modèles sont proches. Cependant, tous les modèles surestiment la résistance par rapport au modèle proposé dans cette étude. Le modèle de l'équation 4.11 développé sur des éléments structuraux de la région du centre Algérien utilisant des matériaux similaires et dans des conditions environnementales similaires est le modèle le plus proche au modèle développé.

L'équation (Eq 4.10) proposée par Dreux souvent utilisé par les organismes de contrôle de la construction, bureaux d'études et laboratoires de béton, sous-estime la résistance dans la zone de faible vitesse (3000 à 3800 m/sec) et surestime celle des vitesses plus élevés (>4000 m/sec).

4.6.3 Corrélation entre la résistance et l'absorption capillaire

4.6.3.1 Pour les carottes

La **Figure 4.27** présente une courbe de corrélation développée entre les résistances à la compression par écrasement «R» et le coefficient d'absorption (en %) des carottes correspondantes. L'expression proposée par cette corrélation est une fonction de forme Logarithmique présentée par l'équation (4.12) avec un coefficient de corrélation faible $r = 0.31$.

$$R = -15,5 \ln (I) + 50,18 \dots \dots \dots L'équation (4.12)$$

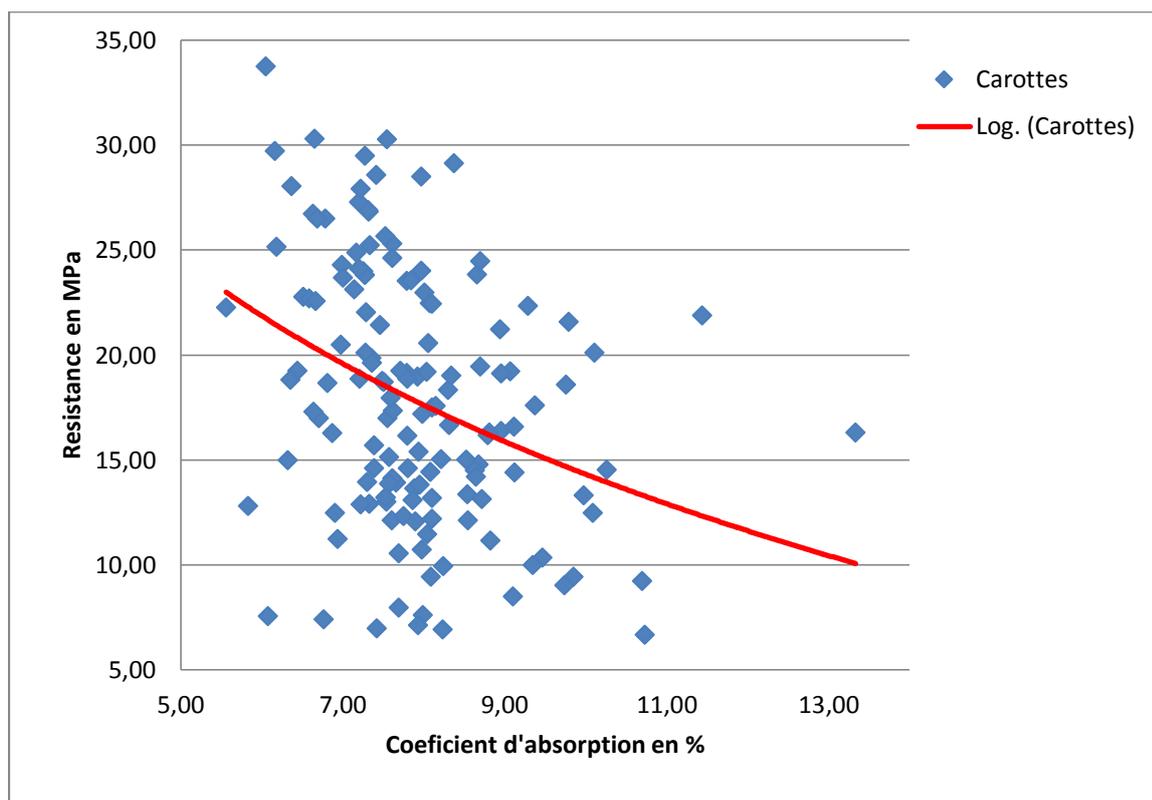


Fig.4.27-Corrélation résistance-absorption pour les carottes

On constate que plus le coefficient d'absorption augmente plus la résistance à la compression diminue. Ceci est connu et prévisible car plus le béton est poreux et plus sa qualité est mauvaise, sa densité est faible et sa résistance est faible. La variation du coefficient d'absorption d'eau de 5 à 13% confirme la qualité moyenne à faible du béton et confirme aussi la variabilité de la qualité du béton observée sur les essais NDT et sur la résistance à la compression des carottes. La porosité élevée est due au manque de cure humide, excès d'eau et manque de vibration.

4.6.3.2 Corrélation entre absorption et résistance par blocs

La **Figure 4.28** présente deux courbes de corrélations développées entre les résistances à la compression par écrasement «R» et le coefficient d'absorption (en %) des carottes correspondants pour les blocs A et B. Les expressions proposées pour ces corrélations sont les suivantes:

| Blocs | A | B |
|-----------|-------------------------------|------------------------------|
| r | 0.397 | 0.260 |
| Equations | $R = -1,445 * C_{ab} + 28,24$ | $R = 0,454 * C_{ab}^{2,656}$ |

Les coefficients de corrélations entre les résistances à la compression par écrasement et les coefficients d'absorption sont très faibles ($r = 0.397$, $r = 0.26$).

Nous constatons que les résistances du bloc B sont supérieures à celles du bloc A, ce qui donne un béton plus poreux au bloc A qu'en bloc B.

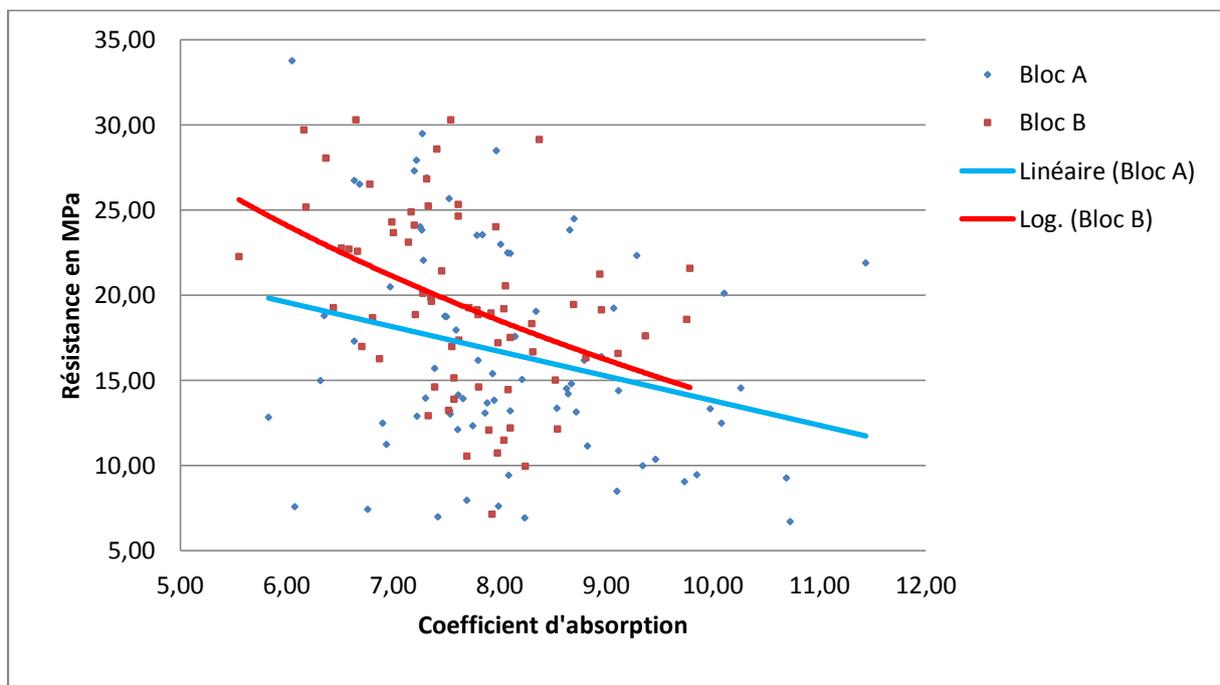


Figure 4 .28 corrélation entre la résistance et le coef-d'absorption pour les deux blocs

Cette figure montre que la classe de résistance est plus élevée dans le Bloc B, le béton du Bloc B est moins poreux que celui du Bloc A cela est due probablement a une meilleur vibration pour les éléments du Bloc B.

4.7 Modèle proposé par la méthode combinée

Les corrélations par la méthode combinée sont établies entre les résistances à la compression par écrasement «R» des carottes prélevées sur les éléments structuraux de l'ouvrage, d'une part et d'autre part les mesures d'auscultations correspondantes (indice de rebondissement «I» & vitesse ultrasonique «V»).

La corrélation combinée basée sur des carottes prélevées sur des éléments d'ouvrage est présentée sous forme graphique par la **figure 4.29** et sous forme d'expression analytique par l'**équation (4.13)** de forme linéaire.

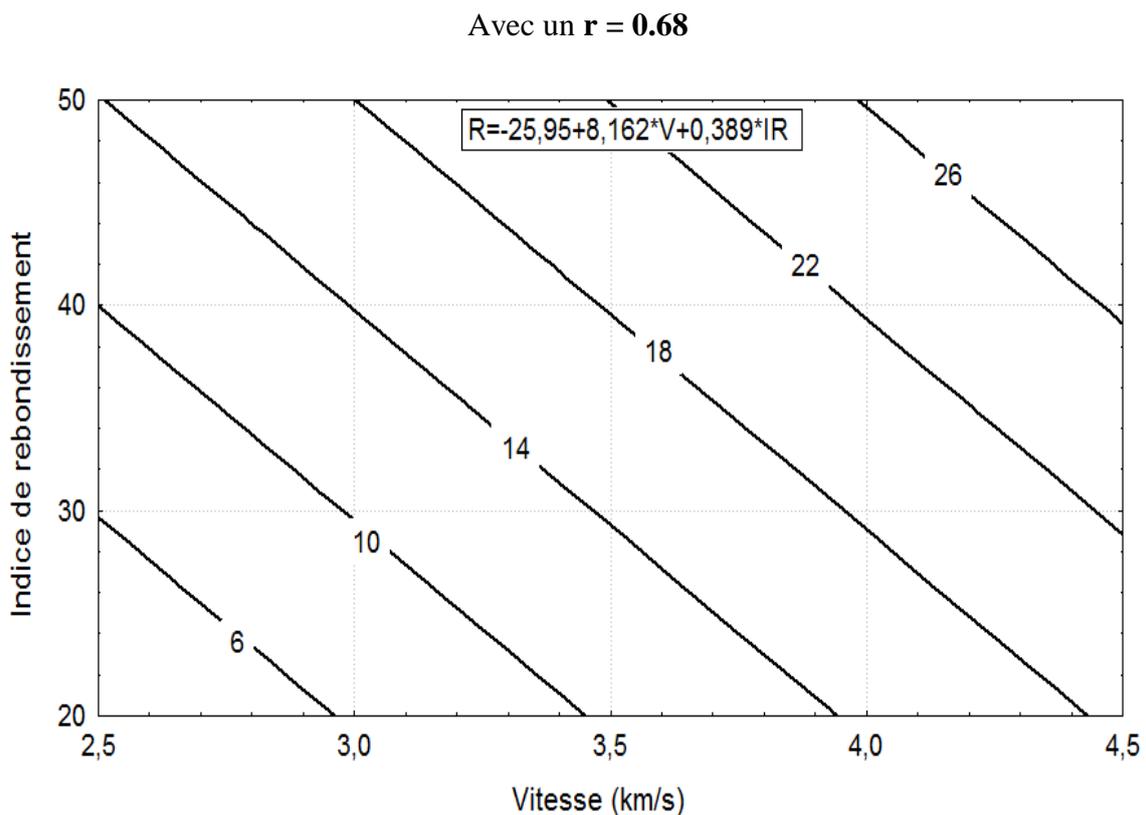


Fig.4.29- Courbe de Corrélation Combinée entre résistance par écrasement des carottes et mesures non destructives sur éléments d'ouvrage

Conclusions Générales

Et Recommandations

❖ Conclusions Générales

Les résultats de l'étude expérimentale menée sur site et au laboratoire par la réalisation des essais NDT au scléromètre et à l'ultrason sur des poteaux et des poutres ainsi que sur des carottes prélevés d'une structure existante ont été analysés. L'analyse de ces résultats a permis de mettre en évidence la différence entre les corrélations établis par les fabricants d'appareils NDT, les corrélations disponibles dans la littérature et les corrélations développées dans le cadre de cette étude.

Les résultats de cette étude nous permettent de conclure ce qui suit :

- L'analyse bibliographique a montré que les bétons produits sur les chantiers Algériens ont généralement de faibles résistances qui atteignent rarement la résistance préconisée par le cahier de charges et présentent une variabilité très élevée.
- L'ouvrage étudié a montré plusieurs anomalies (ségrégations, manque d'enrobage, corrosion, nœuds mal réalisés, etc).
- La résistance à la compression du béton sur les carottes prélevé de cet ouvrage a montré une résistance à la compression moyenne faible 17.13 MPa. Ceci montre la mise en œuvre défectueuse, l'excès d'eau de gâchage, le manque de vibration et de cure humide.
- Une dispersion très élevée des résultats a été observée sur les essais d'écrasements des carottes (écart type = 5.94MPa et coefficient de variation de 35%). La variabilité élevée est une indication du manque de contrôle de qualité sur site, de la variabilité dans les constituants et de la composition du béton.
- L'indice sclérométrique moyen mesuré sur les éléments est de 33.3 avec un écart type de 4.79 et un coefficient de variation de 14 %. Il montre la variabilité élevée de la qualité du béton dans le même ouvrage.
- La vitesse moyenne à l'ultrason mesurée sur les poteaux et poutre est de 3600 m/s. elle est caractéristique d'un béton de bonne qualité. La variabilité est aussi élevé (écart type de 305-306 m/s et coefficient de variation de 8-10%).
- Les essais NDT mesurés sur les carottes ont montré généralement des indices sclérométriques plus élevés que ceux mesurés sur les éléments et des vitesses ultrasoniques plus faibles.
- Les essais NDT mesurés sur carottes ont aussi confirmé la variabilité de la qualité du béton.

Conclusion Générale et Recommandation

- Aucune différence importante n'a été observée entre les résultats des essais NDT sur les poteaux et les poutres. Par contre, une légère différence a été observée entre les différents étages. L'écart type moyen dans les poutres est légèrement inférieur à celui des poteaux, en raison du coulage simultané des poutres, contrairement aux poteaux.
- L'estimation de la résistance à la compression du béton à partir des corrélations proposées par les fabricants des appareils ou celles disponibles dans la littérature surestime la résistance in situ.
- Les corrélations proposées dans le cadre de cette étude sont comme suit :
 - $R_c = f(I)$ avec $r = 0.62$ et une plage de résistance **9 à 25** MPa.
 - $R_c = f(V)$ avec $r = 0.68$ et une plage de résistance **8 à 26** MPa.
 - $R_c = f(I, V)$ avec $r = 0.68$ et une plage de résistance **6 à 26** MPa.
- Pour obtenir des résistances proches de la réalité du béton in situ, l'établissement d'une corrélation (résistance- mesures non destructives) doit être développée sur des bétons de chantier et des bétons fabriqués en laboratoire afin de refléter les pratiques et les conditions de chantier.
- La porosité totale moyenne du béton est de 8.84 % confirmant la mauvaise qualité du béton, le manque de vibration et le rapport Eau/ciment élevé.
- La corrélation suivante entre la résistance à la compression et la porosité totale du béton a été observée avec $r = 0.31$

❖ Recommandations

Le travail réalisé dans le cadre de cette étude concerne un cas d'étude type d'un bâtiment de bureaux en béton armé. Afin d'améliorer la fiabilité et la précision des corrélations proposées et de construire une données des essais NDT. Nous recommandons l'analyse d'autres cas d'études et différents chantiers en cours de réalisation. La collecte et l'analyse statistique des bases de données des différents laboratoires sont aussi recommandées. Des études de corrélations au laboratoire sur des bétons représentatifs des chantiers algériens est aussi souhaitable.

Références bibliographiques :

- [1] M. Lechani, M. Medjani, H. Ait Mohand, “ *Etude Statistique au profit de la qualité de la construction en Algérie* “, 42th science week, Damas, Syrie, novembre 1997.
- [2] K. Ali Benyahia, “ *Corrélation entre Essais non Destructifs et Essais Destructifs du Béton à Faible Résistance* “, Mémoire de Magister, Université de Chlef, Mai 2010.
- [3] S. kenai, “ *Fabrication du Béton et Mise en Œuvre* “, Note de cours, Université de Blida. 2012.
- [4] S. Kenai, B. Menadi, “ *Analyse de Quelques cas pathologique dans le Sud de l'Algérien* “, Actes du Séminaire International sur la qualité du Béton en Climat Chaud, pp.146, Ghardaïa, Algérie, 1994.
- [5] J. Zreik, “ *Comportement du Béton au jeune âge dans une structure massive* “, Application au cas de réparation des ouvrages.
- [6] N. Hannachi, S. Kenai, M. Lechani, “ *Etude statistique des sinistres dans l'EST de l'Algérois* “, Annales de l'institut national du bâtiment et des travaux publics, juin 1995. 25p.
- [7] M. Oualit, “ *Indicateur de durabilité du béton dans le contexte Algérien* “, Mémoire de Magister, Boumerdès 2009.
- [8] NF EN 934-2, “ *Adjuvant pour Béton, Mortier et Coulis, Partie 2: Adjuvant pour Béton*“, AFNOR, Mai 2005
- [9] ACI 308R-01, “*Guide to Curing Concrete* “, ACI Committee 308, August 2001.
- [10] NF EN 12504-2, “ *Essais pour béton dans les structures. Partie 2 : Essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement*“, AFNOR, 2003.
- [11] ASTM C805-02, “*Standard test method for rebound number of hardened concrete*“, ASTM International, 2002, 3p

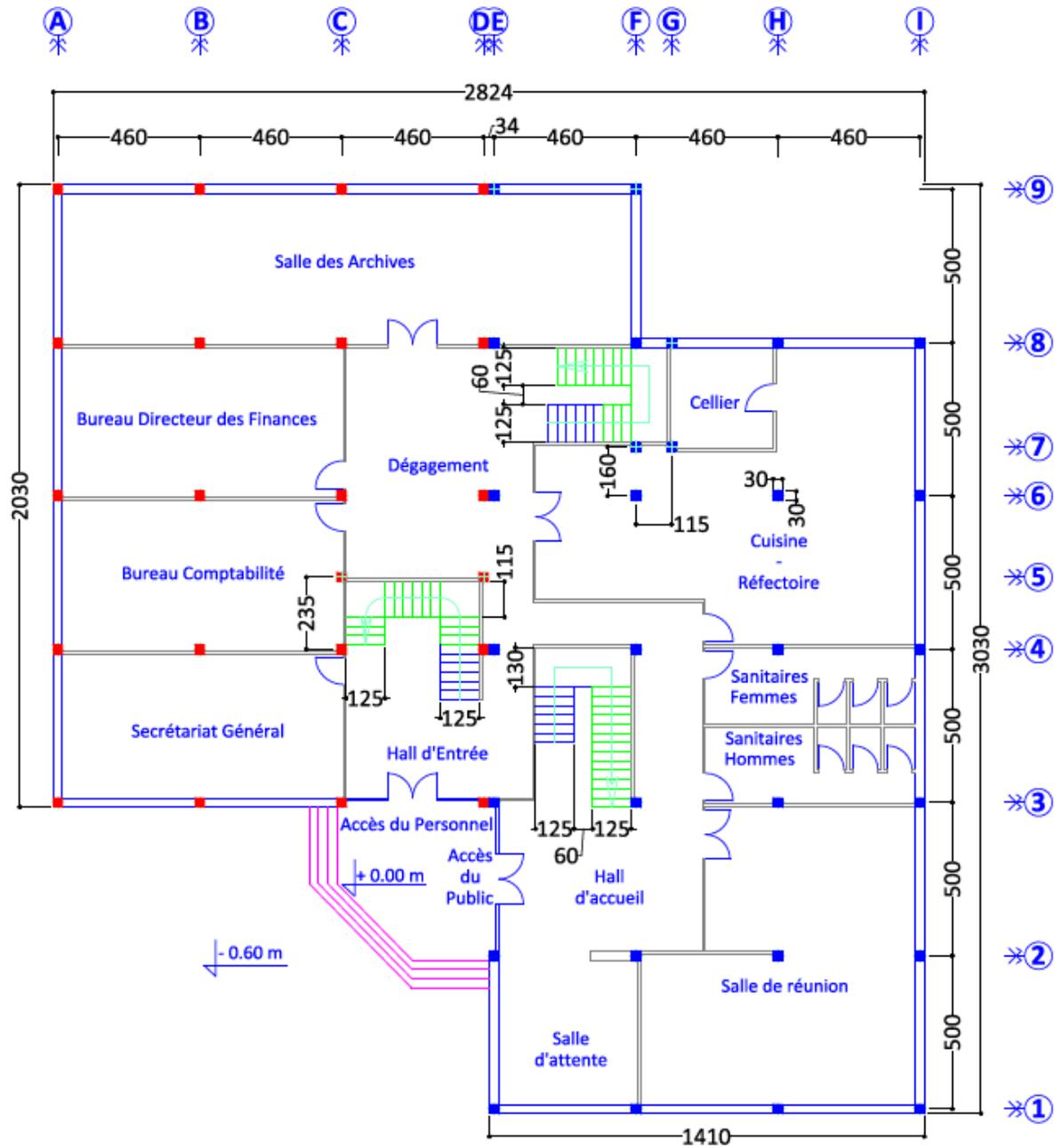
-
- [12] NF EN 12504-4, “ *Essais pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son*“, AFNOR, 2005.
- [13] ASTM C597-02, “*Standard test method for pulse velocity through concrete*“, ASTM International, 2003, 4p.
- [14] NF EN 12390-3, “ *Essais pour béton durci, Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes*“, AFNOR, 2001.
- [15] NF EN 12504-1, “ *Essais pour béton dans les structures, Partie 1 : Carottes - Prélèvement, examen et essais en compression*“, AFNOR, 2000.
- [16] BS EN 13791, “*Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components*“British standard, 2007.
- [17] ASTM C39/C39M-01, “*Compressive strength of cylindrical concrete specimens*“ASTM International, Février 2001.4p.
- [18] J.H. Bungey, S.G. Millard, “*Testing of Concrete in Structures*” Taylor & Francis e-Library, 2004.
- [19] D. Breysse, M. Larget, Z. M. Sbartai, J. Lataste, J. Balayssac, “*Quality of NDT measurements and accuracy of concrete physical properties*“, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, France, 2009
- [20] A. N. Bin Ibrahim, P. Bin Ismail, M. Forde, “*Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*“, International Atomic Energy Agency Vienne, 2002.
- [21] L. Bouazza, “ *Control non destructif par la méthode combinée Ultrason-Scléromètre*“, Conférence magrébine sur le control non destructif, Alger, 28-30 juin 1997.
- [22] R. Govind Khare, “*Prediction of compressive strength of concrete by various non-destructive tests methods*“, Essar Engineering Center, Mumbai. 15p.
- [23] R. F. Feidman , “ *Essais non destructifs du béton*“, CBD-187-F, 2005.
- [24] H. Y. Qasrawi , “ *Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted*“, Cement and Concrete Research, Vol.30, 2000, pp.739-746.
-

- [25] V. Mohan Malhotra, “*Surface hardness method*“, Department of Natural Resources Canada, Ottawa, Handbook on non-destructive testing, 2004.
- [26] Tarun R. Naik , V. Mohan Malhotra , John S. Popovics, “ *The Ultrasonic Pulse Velocity Method*“, University of Wisconsin–Milwaukee , Department of Natural Resources Canada, Ottawa University of Illinois at Urbana–Champaign, Handbook on non destructive testing , 2004.
- [27] Aleksander Samarin , “ *Combined Methods* “, Handbook on non-destructive testing , 2004.
- [28] M.M. IDRISOU, “*Reliability in interpreting non-destructive testing (NDT) results of concrete structures*“, Faculty de Genie Civil, university de Malaysia, Avril 2006.
- [29] A. C. Evangelista, I. Shehata, L. Shehata, “*Parameters that influence the results of non- destructive test methods for concrete strength*“, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, 2003
- [30] B. Hobbs, M. T. Kebir, “*Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings*“, Forensic Science International, Vol.167, 2007. pp.167-172.
- [31] CONTROLS, “*Instruction manual*“, Concrete Hammer, Mod. 58-C0181/N, 2000.
- [32] G. Dreux, J. Festa, “*Nouveau guide du béton et de ses constituants*“, Edition Eyrolles, 2002.
- [33] M. Lechani, N. Hannachi, N. Yantren “ *Contrôle de la qualité de béton cas de wilaya de Tiziouzou*“, Ecole national des travaux publics 1983.
- [34] D. Breysse, M. Soutos, R. Felicetti, M. Krause, G. Lataste, A. Moczko “ *How to improve the quality of concrete assessment by combining several NDT Measurements*“, Non Destructive Testing in Civil Engineering, France 2009.8p.

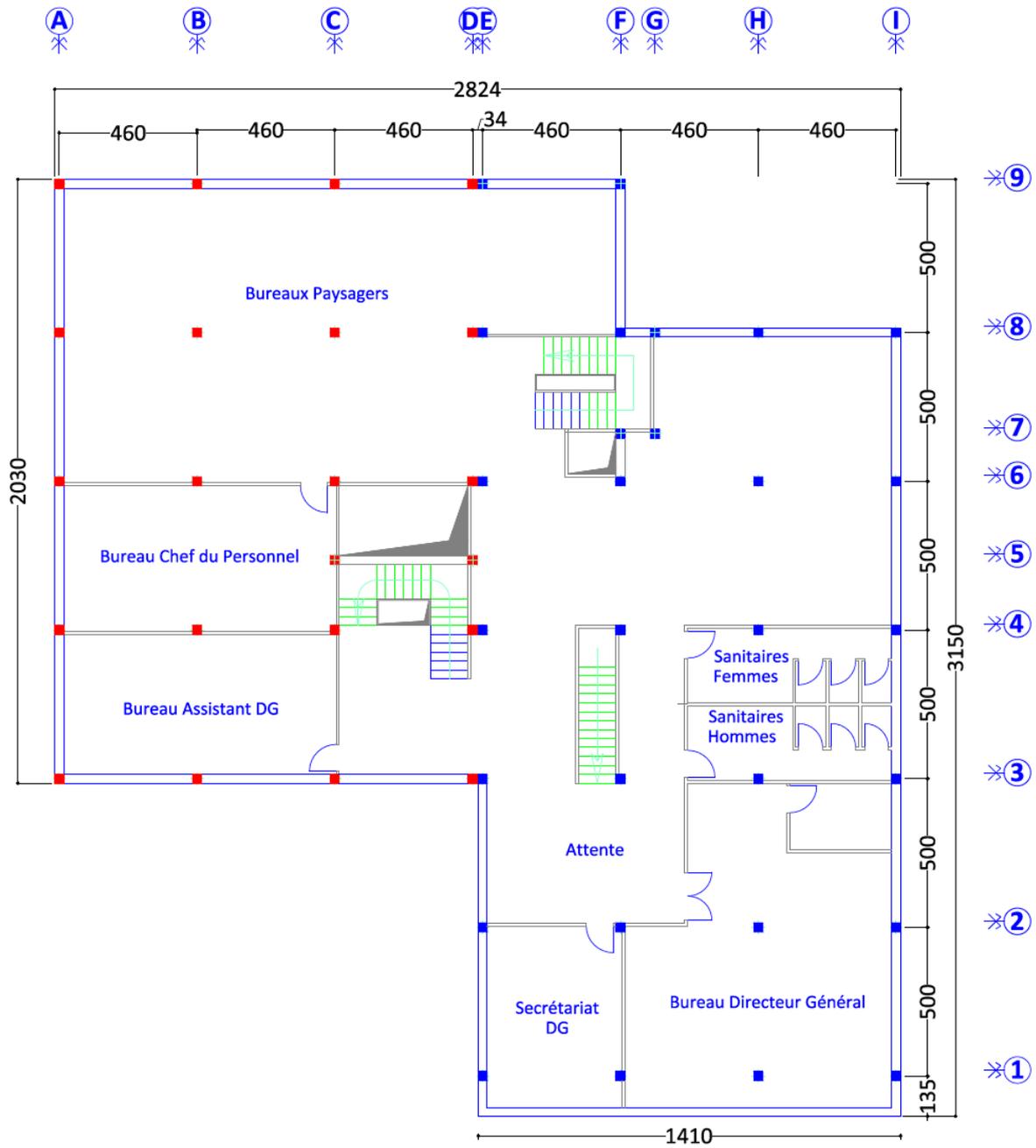
- [35] T. Soshiroda, K. Voraputhaporn, Y. Nozaki, “*Early-stage inspection of concrete quality in structures by combined non-destructive method*“, Materials and Structures, Vol.39, 2006, pp.149-160.
- [36] H. Ait Mohand, “*Courbes d’ajustements relatives aux différents essais non destructifs*“, Mémoire de Magister, Institut Génie Civil, Université de Tizi-Ouzou, 1995.
- [37] S. Kenai, R. Bahar, “*Evaluation and repair of Algiers new airport building*“, Cement & Concrete Composites, vol.25, 2003, pp.633-641.
- [38] S. Kenai, B. Menadi, M. Ben Rakia, D. Boukhelkhal “*Utilisation des essais non destructifs en vue développer des corrélations pour l’évaluation de béton de faible résistance*“, Université de Blida, Algérie
- [39] D. Boukhelkhal “*Corrélations entre Essais non destructifs et essais destructifs de la résistance à la compression du béton : Essais en laboratoire*“, Thèse de Magister, Université de Médéa, Algérie, Octobre 2011.
- [40] M. Benrokia “*Corrélations entre Essais non destructifs et essais destructifs de la résistance à la compression du béton : Essais en laboratoire*“, Thèse de Magister, Université de Médéa, Algérie, Octobre 2011.

Annexe "I"

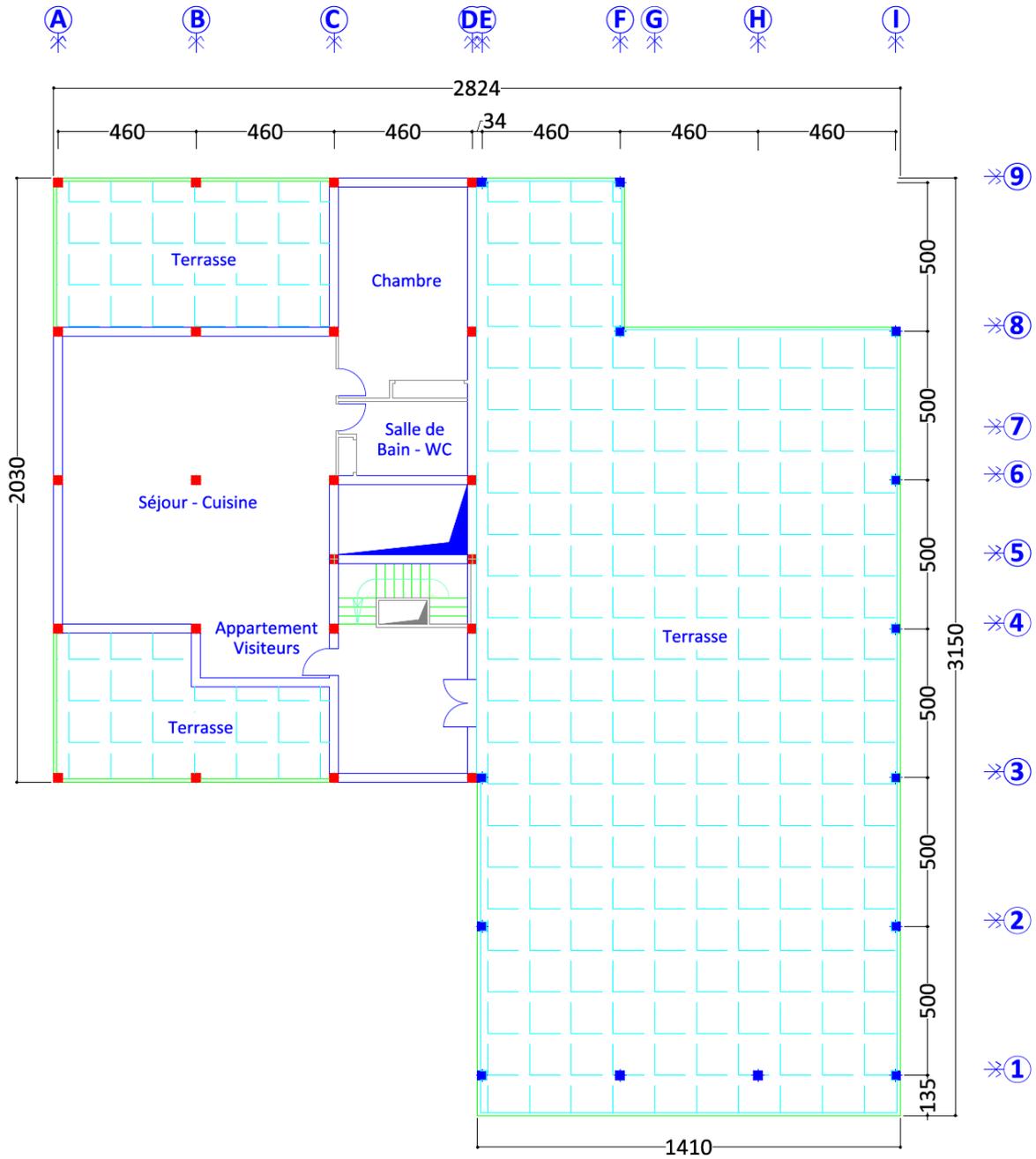
Plans D'Architecture de la Structure Etudiée



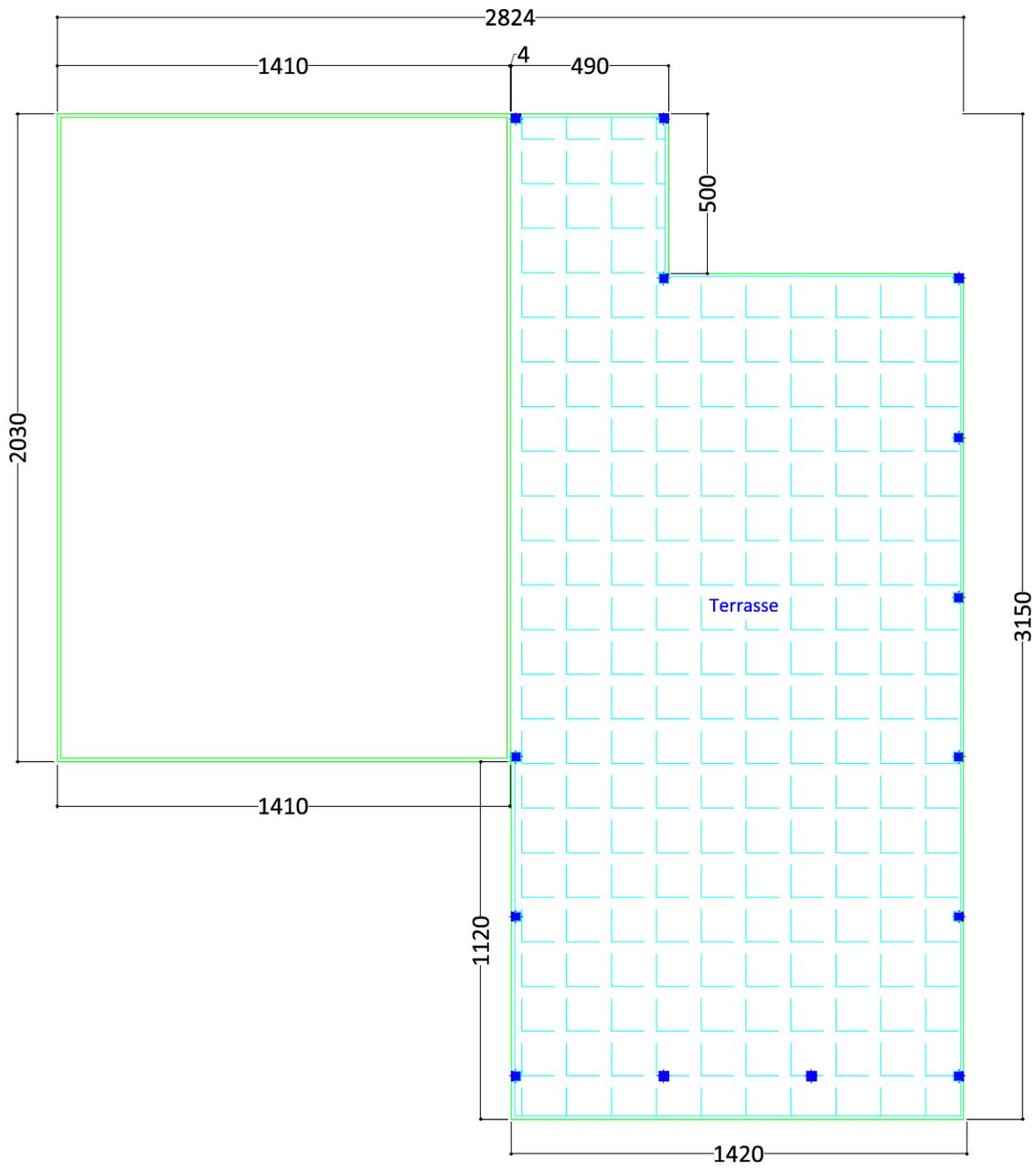
Plan du Rez de Chaussée



Plan du 1er Etage



Plan du 2ème Etage



Plan Toiture Terrasse

Annexe "II"

Les points de Carottage sélectionné pour chaque Poteau

| Portique de l'axe A | | | | | | | |
|---------------------|----------|-------|---|---|---|---|---|
| Poreaux | Axe | | 3 | 4 | 6 | 8 | 9 |
| | Niveau 2 | Bas | X | X | / | / | / |
| | | Mi-Ht | X | X | X | X | |
| | | Haut | X | X | X | / | X |
| | Niveau 1 | Bas | X | / | / | / | / |
| | | Mi-Ht | / | X | / | X | X |
| | | Haut | X | / | X | / | / |
| | RDC | Bas | / | / | / | / | / |
| | | Mi-Ht | / | X | / | X | X |
| | | Haut | X | / | X | / | / |

| Portique de l'axe B | | | | | | | |
|---------------------|----------|-------|---|---|---|---|---|
| Poreaux | Axe | | 3 | 4 | 6 | 8 | 9 |
| | Niveau 2 | Bas | X | X | X | X | X |
| | | Mi-Ht | / | / | / | / | / |
| | | Haut | / | / | / | / | / |
| | Niveau 1 | Bas | / | X | / | / | / |
| | | Mi-Ht | / | / | / | / | / |
| | | Haut | / | / | X | / | X |
| | RDC | Bas | / | / | / | / | / |
| | | Mi-Ht | / | / | / | / | / |
| | | Haut | X | / | X | / | / |

| Portique de l'axe C | | | | | | | |
|---------------------|----------|-------|---|---|---|---|---|
| Poreaux | Axe | | 3 | 4 | 6 | 8 | 9 |
| | Niveau 3 | Bas | / | / | / | / | / |
| | | Mi-Ht | / | X | X | / | / |
| | | Haut | / | / | / | / | / |
| | Niveau 2 | Bas | X | / | / | / | / |
| | | Mi-Ht | / | X | / | X | / |
| | | Haut | / | / | X | / | X |
| | Niveau 1 | Bas | / | / | / | / | / |
| | | Mi-Ht | X | X | / | X | / |
| | | Haut | / | / | X | / | X |
| | RDC | Bas | / | / | / | / | / |
| | | Mi-Ht | X | / | / | X | / |
| Haut | | / | / | / | / | X | |

| Portique de l'axe D | | | | | | | |
|---------------------|----------|-------|---|---|---|---|---|
| Poreaux | Axe | | 3 | 4 | 6 | 8 | 9 |
| | Niveau 3 | Bas | / | X | X | / | / |
| | | Mi-Ht | / | / | / | / | / |
| | | Haut | / | / | / | / | / |
| | Niveau 2 | Bas | / | / | / | / | / |
| | | Mi-Ht | / | / | / | / | / |
| | | Haut | X | X | X | X | X |
| | Niveau 1 | Bas | / | / | / | X | X |
| | | Mi-Ht | / | / | X | / | / |
| | | Haut | X | X | / | / | / |
| | RDC | Bas | X | X | / | / | / |
| | | Mi-Ht | / | / | X | / | / |
| Haut | | / | / | / | X | X | |

| Portique de l'axe E | | | | | | | | | |
|---------------------|----------|-------|---|---|---|---|---|---|---|
| Poreaux | Axe | | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 9 |
| | Niveau 1 | Bas | / | X | / | / | X | / | X |
| | | Mi-Ht | / | / | X | X | / | X | / |
| | | Haut | / | / | / | X | / | X | X |
| | RDC | Bas | / | X | / | / | X | / | / |
| | | Mi-Ht | / | / | X | / | / | / | / |
| | | Haut | X | / | / | X | / | X | X |

| Portique de l'axe F | | | | | | | | | |
|---------------------|----------|-------|---|---|---|---|---|---|---|
| Poreaux | Axe | | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 9 |
| | Niveau 1 | Bas | / | X | / | / | X | / | / |
| | | Mi-Ht | / | / | / | X | / | / | / |
| | | Haut | X | / | / | / | / | / | / |
| | RDC | Bas | X | X | / | / | X | / | X |
| | | Mi-Ht | / | / | / | X | / | X | / |
| | | Haut | / | / | / | / | / | / | / |

| Portique de l'axe H | | | | | | | | |
|---------------------|----------|-------|---|---|---|---|---|---|
| Poteaux | Axe | | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 |
| | Niveau 1 | Bas | / | / | X | / | / | / |
| | | Mi-Ht | X | X | / | / | / | / |
| | | Haut | / | / | / | X | X | X |
| | RDC | Bas | / | / | X | / | / | / |
| | | Mi-Ht | X | / | / | / | / | / |
| | | Haut | / | / | / | X | X | X |

| Portique de l'axe I | | | | | | | | |
|---------------------|----------|-------|---|---|---|---|---|---|
| Poreaux | Axe | | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 |
| | Niveau 1 | Bas | X | / | / | / | X | / |
| | | Mi-Ht | / | X | / | / | / | X |
| | | Haut | / | / | X | X | / | / |
| | RDC | Bas | X | / | X | / | X | / |
| | | Mi-Ht | / | X | / | X | X | / |
| | | Haut | / | / | / | / | / | X |

Les points de Carottage sélectionné pour chaque Poutre

| Portique de l'axe B | | | | | | |
|---------------------|----------|--------|-----|-----|-----|-----|
| Poutre | Axes | | 3-4 | 4-6 | 6-8 | 8-9 |
| | Niveau 2 | Gauche | X | X | / | X |
| | | Mi-Tr | X | / | X | / |
| | | Droite | X | X | / | / |
| | Niveau 1 | Gauche | X | X | X | / |
| | | Mi-Tr | X | X | X | X |
| | | Droite | / | / | / | X |
| | RDC | Gauche | X | / | / | X |
| | | Mi-Tr | / | X | / | X |
| | | Droite | / | X | X | / |

| Portique de l'axe C | | | | | | |
|---------------------|----------|--------|-----|-----|-----|-----|
| Poutre | Axes | | 3-4 | 4-6 | 6-8 | 8-9 |
| | Niveau 2 | Gauche | / | / | / | / |
| | | Mi-Tr | / | / | / | X |
| | | Droite | X | / | X | / |
| | Niveau 1 | Gauche | X | / | / | X |
| | | Mi-Tr | / | / | X | X |
| | | Droite | / | / | X | / |
| | RDC | Gauche | / | / | / | / |
| | | Mi-Tr | X | / | X | X |
| | | Droite | X | / | X | X |

| Portique de l'axe D | | | | | | |
|---------------------|----------|--------|-----|-----|-----|-----|
| Poutre | Axes | | 3-4 | 4-6 | 6-8 | 8-9 |
| | Niveau 2 | Gauche | / | / | / | X |
| | | Mi-Tr | X | / | / | X |
| | | Droite | / | / | X | / |

| Portique de l'axe F | | | | | | | |
|---------------------|----------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Poutre | Axes | | 3-4 | 4-6 | 6-8 | 6-8 | 8-9 |
| | Niveau 1 | Gauche | / | X | / | / | / |
| | | Mi-Tr | X | X | / | X | / |
| | | Droite | / | X | / | / | / |
| | RDC | Gauche | / | / | / | / | / |
| | | Mi-Tr | / | / | / | / | / |
| | | Droite | / | / | / | / | / |

| Portique de l'axe H | | | | | | | |
|---------------------|----------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Poutre | Axes | | 3-4 | 4-6 | 6-8 | 6-8 | 8-9 |
| | Niveau 1 | Gauche | / | / | X | X | X |
| | | Mi-Tr | / | X | X | X | X |
| | | Droite | X | X | / | X | / |
| | RDC | Gauche | / | / | X | X | X |
| | | Mi-Tr | X | X | X | X | X |
| | | Droite | / | X | / | X | / |

Annexe "III"

Essais Sclerométrique (in situ)

Poteaux (bloc A)

| Niveau 3 | | | | | | | | | | | | | | Ind,med |
|------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|
| Poteau 4-C | Bas | 36 | 28 | 29 | 26 | 28 | 32 | 35 | 33 | 30 | 27 | 36 | 33 | 31 |
| | Mi-Ht | 32 | 31 | 31 | 30 | 29 | 31 | 25 | 32 | 27 | 32 | 32 | 30 | 31 |
| | Haut | 31 | 26 | 26 | 31 | 30 | 28 | 27 | 31 | 32 | 28 | 34 | 35 | 31 |
| Poteau 6-C | Bas | 33 | 38 | 36 | 40 | 35 | 35 | 36 | 42 | 42 | 40 | 38 | 36 | 37 |
| | Mi-Ht | 34 | / | 34 | 35 | 33 | 41 | 40 | 36 | 41 | 38 | 33 | 36 | 36 |
| | Haut | 35 | 38 | 34 | / | 37 | 32 | 33 | 31 | 32 | 30 | 30 | 36 | 33 |
| Poteau 6-D | Bas | 43 | 39 | 40 | / | 36 | 37 | 42 | 45 | 44 | 37 | 35 | 42 | 40 |
| | Mi-Ht | 37 | 41 | 43 | 36 | 40 | 39 | 39 | 42 | 38 | 34 | 36 | 35 | 39 |
| | Haut | 43 | 42 | 36 | 38 | 42 | 44 | 41 | 38 | 45 | 45 | 42 | 39 | 42 |
| Poteau 4-D | Bas | 32 | 28 | 32 | 32 | 32 | 26 | 29 | 32 | 27 | 26 | 30 | 25 | 30 |
| | Mi-Ht | 38 | 32 | 31 | 36 | 32 | 30 | 32 | 30 | 32 | 32 | 28 | 28 | 32 |
| | Haut | 32 | 30 | 30 | 37 | 30 | 28 | 31 | 30 | 32 | 33 | 31 | 31 | 31 |
| Niveau 2 | | | | | | | | | | | | | | Ind,med |
| Poteau 3-A | Bas | 33 | 32 | 35 | 35 | 28 | 29 | 29 | 31 | 28 | 33 | 34 | 28 | 32 |
| | Mi-Ht | 35 | 37 | 32 | 29 | 33 | 39 | 34 | 30 | 34 | 33 | 32 | 35 | 34 |
| | Haut | 29 | 32 | 28 | 30 | 30 | 32 | 30 | 29 | 30 | 28 | 30 | 29 | 30 |
| Poteau 4-A | Bas | 30 | 28 | 32 | 34 | 26 | 25 | 24 | 25 | 30 | 29 | 31 | 31 | 30 |
| | Mi-Ht | 34 | 36 | / | 36 | / | 36 | 37 | 34 | 35 | 33 | 35 | 32 | 35 |
| | Haut | 35 | 32 | 35 | 30 | 29 | 32 | 34 | 31 | 34 | 32 | 37 | 37 | 33 |
| Poteau 6-A | Bas | 22 | 30 | 28 | 27 | 24 | / | 32 | 28 | 23 | / | 26 | 26 | 27 |
| | Mi-Ht | 31 | 30 | 36 | 31 | 28 | 35 | 30 | 30 | 36 | 31 | 35 | 31 | 31 |
| | Haut | 40 | 39 | 37 | 29 | 32 | 36 | 31 | 35 | 35 | 36 | 31 | 39 | 36 |
| Poteau 8-A | Bas | 34 | 34 | 37 | 36 | 38 | 42 | 32 | 34 | 34 | 42 | 42 | 39 | 37 |
| | Mi-Ht | 40 | 42 | 40 | 40 | 38 | 44 | 43 | 44 | 39 | 41 | 41 | 40 | 41 |
| | Haut | 35 | 37 | 39 | 37 | 32 | 38 | 31 | 32 | 35 | 38 | 37 | 36 | 37 |
| Poteau 9-A | Bas | 36 | 36 | 40 | 34 | 34 | 33 | 41 | 34 | 36 | / | 39 | / | 36 |
| | Mi-Ht | 36 | 33 | 32 | 34 | 29 | 32 | 34 | 30 | 36 | 32 | 31 | 33 | 33 |
| | Haut | 30 | 32 | 35 | 32 | 35 | 32 | 32 | 34 | 32 | 32 | 30 | 34 | 32 |
| Poteau 9-B | Bas | 34 | 37 | 31 | 41 | 31 | 36 | 41 | 29 | 41 | / | 34 | 36 | 36 |
| | Mi-Ht | 36 | 32 | 34 | 28 | 28 | 35 | 32 | 37 | 30 | 28 | 29 | 32 | 32 |
| | Haut | 31 | 33 | 33 | 32 | 28 | 32 | 30 | 38 | 36 | 30 | 29 | 30 | 32 |
| Poteau 8-B | Bas | 35 | 36 | 35 | 34 | 36 | 34 | 35 | 30 | 32 | 35 | 33 | 32 | 35 |
| | Mi-Ht | 34 | 32 | 31 | 32 | 34 | 34 | 29 | 32 | 31 | 33 | 29 | 29 | 32 |
| | Haut | 26 | 26 | 26 | 28 | 27 | 25 | 26 | 31 | 25 | 29 | 26 | 32 | 26 |
| Poteau 6-B | Bas | 36 | 39 | 42 | 38 | 34 | 33 | 34 | 35 | 31 | 36 | 33 | 39 | 36 |
| | Mi-Ht | 31 | 28 | 28 | 34 | 36 | 30 | 30 | 32 | 26 | 37 | 32 | 30 | 31 |
| | Haut | 34 | 27 | 29 | 27 | 26 | 29 | 28 | 32 | 27 | 30 | 32 | 28 | 29 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------------|
| Poteau 4-B | Bas | 34 | 32 | 30 | 26 | 32 | 28 | 31 | 30 | 31 | 29 | 31 | 33 | 31 |
| | Mi-Ht | 30 | 29 | 26 | 30 | 33 | 26 | 28 | 27 | 26 | 34 | 36 | 31 | 30 |
| | Haut | 30 | 26 | 30 | 27 | 26 | 30 | 25 | 25 | 28 | 26 | 28 | 25 | 27 |
| Poteau 3-B | Bas | 39 | | 30 | 28 | 30 | 33 | 34 | 37 | 35 | 30 | 36 | 35 | 34 |
| | Mi-Ht | 33 | 33 | 34 | 31 | 28 | 35 | 38 | 34 | 34 | 34 | 37 | 38 | 34 |
| | Haut | 28 | 26 | 36 | 29 | 27 | 30 | 32 | 32 | 26 | 32 | 26 | 30 | 30 |
| Poteau 3-C | Bas | 32 | 29 | 31 | 32 | 35 | 26 | 32 | 32 | 36 | 35 | 38 | 35 | 32 |
| | Mi-Ht | 34 | 41 | 31 | 38 | 38 | 32 | 38 | 32 | 37 | 31 | / | 35 | 35 |
| | Haut | 30 | 28 | 31 | 30 | 28 | 31 | 32 | 31 | 34 | 38 | 30 | 32 | 31 |
| Poteau 4-C | Bas | 33 | 35 | 36 | 36 | 32 | 38 | 32 | 30 | 36 | 31 | 37 | 34 | 35 |
| | Mi-Ht | 30 | 30 | 26 | 26 | 35 | 28 | / | 30 | 27 | 28 | 27 | 30 | 28 |
| | Haut | 32 | 27 | 27 | 28 | 31 | 25 | 27 | 27 | 29 | 31 | 27 | 29 | 28 |
| Poteau 6-C | Bas | 31 | 28 | 38 | 34 | 26 | 32 | 30 | 32 | 34 | 34 | 30 | 32 | 32 |
| | Mi-Ht | 38 | 35 | 33 | 35 | 29 | 33 | 29 | 31 | 28 | 36 | 30 | 35 | 33 |
| | Haut | 28 | 25 | 30 | 32 | 28 | 25 | 27 | 29 | 28 | 27 | 27 | 27 | 28 |
| Poteau 8-C | Bas | 37 | 30 | 32 | 38 | 40 | 33 | 37 | 36 | / | 31 | 36 | 36 | 36 |
| | Mi-Ht | 36 | / | 30 | 30 | 33 | 30 | 31 | 30 | 30 | 32 | 29 | 26 | 30 |
| | Haut | 29 | 33 | 30 | 31 | 29 | 29 | 31 | 29 | 31 | 29 | 34 | 31 | 31 |
| Poteau 9-C | Bas | 41 | 41 | 37 | / | 43 | 36 | 36 | 37 | 32 | 40 | 31 | 34 | 37 |
| | Mi-Ht | 33 | 29 | 31 | 36 | 31 | 33 | 30 | 30 | 30 | 35 | 36 | 30 | 31 |
| | Haut | 30 | 28 | 29 | 30 | 33 | 26 | 29 | 26 | 24 | 32 | 30 | 38 | 30 |
| Poteau 9-D | Bas | 39 | 35 | 37 | 38 | 41 | 37 | 36 | 38 | 33 | 35 | 32 | 39 | 37 |
| | Mi-Ht | 30 | 31 | 34 | 32 | 35 | 28 | 28 | 28 | 32 | 34 | 34 | 36 | 32 |
| | Haut | 34 | 31 | 31 | 33 | 34 | 30 | 33 | 29 | 31 | 31 | 31 | 34 | 31 |
| Poteau 8-D | Bas | 40 | 34 | / | 37 | 36 | 36 | 36 | 36 | 33 | 33 | 36 | 33 | 36 |
| | Mi-Ht | 32 | 30 | 32 | 30 | 30 | 32 | 30 | 27 | 32 | 34 | 31 | 28 | 31 |
| | Haut | 32 | 29 | 30 | 29 | 27 | 34 | 34 | 28 | 32 | 28 | 27 | 28 | 29 |
| Poteau 6-D | Bas | 34 | / | 32 | 34 | 40 | 35 | 38 | 34 | 36 | 40 | 35 | 30 | 35 |
| | Mi-Ht | 34 | 37 | 37 | 36 | 33 | 36 | 32 | 31 | 32 | 36 | 28 | 32 | 34 |
| | Haut | 30 | 31 | 31 | 31 | 27 | 29 | 29 | 30 | 28 | 32 | 36 | 27 | 30 |
| Poteau 4-D | Bas | 30 | 34 | 33 | 36 | 31 | 35 | 40 | 39 | 36 | 30 | 32 | 36 | 35 |
| | Mi-Ht | 30 | 30 | 30 | 36 | / | / | 31 | 36 | 34 | 29 | 32 | 30 | 31 |
| | Haut | 33 | 26 | 28 | 26 | 29 | 30 | 34 | 31 | 26 | 29 | 31 | 31 | 30 |
| Poteau 3-D | Bas | 36 | | 32 | 32 | 35 | 33 | 40 | 31 | 33 | 41 | 35 | 38 | 35 |
| | Mi-Ht | 31 | 31 | 27 | 31 | 36 | 30 | 37 | 36 | 37 | 28 | 32 | 36 | 32 |
| | Haut | 33 | 31 | 29 | 29 | 31 | 30 | 32 | 28 | 30 | 32 | 38 | 32 | 31 |
| Niveau 1 | | | | | | | | | | | | | | Ind,med |
| Poteau 3-A | Bas | 36 | 34 | 39 | 36 | 34 | 33 | 34 | 35 | / | 34 | / | 34 | 34 |
| | Mi-Ht | 39 | 42 | 42 | 44 | 33 | 41 | 42 | 45 | 43 | 37 | / | 37 | 42 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 4-A | Bas | 29 | 30 | 30 | 31 | / | 35 | 32 | 33 | 34 | 31 | 29 | 29 | 31 |
| | Mi-Ht | 44 | 34 | 35 | 36 | 39 | 41 | 41 | 40 | 42 | 40 | | 37 | 40 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Poteau 6-A | Bas | 36 | 37 | 40 | / | 44 | 32 | 38 | 34 | 40 | 34 | 34 | 40 | 37 |
| | Mi-Ht | 40 | | 36 | 34 | 30 | 33 | 36 | 34 | 35 | 41 | 35 | 35 | 35 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 8-A | Bas | 30 | 34 | 32 | 28 | 29 | 27 | 26 | 28 | 26 | 24 | 29 | 28 | 28 |
| | Mi-Ht | 33 | 26 | 26 | 32 | 31 | 30 | 34 | 30 | 30 | 29 | 24 | 29 | 30 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 9-A | Bas | 42 | 40 | 40 | 42 | 36 | 35 | 36 | | 40 | 42 | 39 | | 40 |
| | Mi-Ht | 40 | 42 | 42 | 36 | 33 | 35 | 38 | 42 | 35 | 41 | 35 | 38 | 38 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 9-B | Bas | 40 | 34 | 35 | 40 | 34 | 36 | 41 | 43 | 37 | 37 | 39 | | 37 |
| | Mi-Ht | 34 | 31 | 42 | 39 | 36 | 37 | 44 | 45 | 31 | 33 | 39 | 39 | 38 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 8-B | Bas | / | / | 33 | | 30 | 36 | 31 | 29 | 29 | 31 | | 31 | 32 |
| | Mi-Ht | 30 | 30 | 36 | 28 | 28 | 34 | 28 | 30 | 28 | 32 | 28 | 32 | 30 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 6-B | Bas | 27 | 26 | 23 | 26 | 28 | 31 | 27 | 26 | 28 | 20 | 26 | 26 | 26 |
| | Mi-Ht | 34 | 29 | 34 | 29 | 31 | 30 | 29 | 29 | 31 | 30 | 31 | 29 | 30 |
| | Haut | 30 | 29 | 26 | 28 | 29 | 28 | 27 | 32 | 30 | 26 | 30 | 34 | 29 |
| Poteau 4-B | Bas | 28 | 29 | 28 | 29 | 28 | 32 | 30 | 28 | 29 | 27 | 28 | 31 | 29 |
| | Mi-Ht | 29 | 30 | 34 | 30 | 34 | 35 | 37 | 33 | 34 | 35 | 29 | 33 | 34 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 3-B | Bas | 32 | 31 | 33 | 37 | 30 | 34 | 31 | 29 | 32 | 35 | 30 | 31 | 32 |
| | Mi-Ht | 32 | 29 | 31 | 34 | 28 | 32 | 27 | 32 | 30 | 37 | 30 | 33 | 32 |
| | Haut | 31 | 30 | 30 | 36 | 26 | 30 | 28 | 28 | 30 | 32 | 26 | 30 | 30 |
| Poteau 3-C | Bas | 29 | 30 | 33 | 35 | 37 | 34 | 34 | 28 | | 32 | 31 | 33 | 33 |
| | Mi-Ht | 31 | 30 | 31 | 31 | 32 | 34 | 36 | 34 | 36 | 32 | 34 | 32 | 32 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 4-C | Bas | | 30 | 31 | 28 | 33 | 29 | 32 | 29 | 25 | 27 | 25 | 35 | 29 |
| | Mi-Ht | 30 | 28 | 29 | 32 | 30 | 30 | 34 | | 33 | 32 | 32 | 32 | 32 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 6-C | Bas | 39 | 34 | 33 | 30 | 40 | 35 | 34 | | 29 | | 31 | 31 | 34 |
| | Mi-Ht | | 35 | 31 | 34 | 30 | 28 | 31 | 29 | 28 | 29 | 31 | 30 | 30 |
| | Haut | 28 | 23 | 38 | 43 | 40 | 41 | 41 | 46 | 3 | 33 | 38 | 38 | 38 |
| Poteau 8-C | Bas | 32 | 29 | 29 | 30 | 31 | 34 | 34 | 32 | 37 | 33 | 26 | 33 | 32 |
| | Mi-Ht | 31 | 32 | 33 | 36 | 33 | 33 | 32 | 35 | 37 | 31 | 31 | 34 | 33 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 9-C | Bas | 32 | 34 | 34 | 33 | 31 | 30 | | 29 | 37 | 35 | 35 | 29 | 33 |
| | Mi-Ht | 41 | 35 | 39 | 34 | 36 | 33 | 33 | 39 | 40 | 36 | 37 | 34 | 36 |
| | Haut | 32 | 29 | 37 | 34 | 29 | 33 | 33 | 32 | 36 | 36 | 35 | 29 | 33 |
| Poteau 9-D | Bas | 35 | 30 | 31 | 36 | 34 | 40 | 34 | 37 | 32 | | 34 | 29 | 34 |
| | Mi-Ht | 32 | 36 | | 37 | 37 | 38 | 36 | 36 | 36 | 37 | 39 | 35 | 36 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 8-D | Bas | 27 | 33 | 31 | 33 | 34 | 34 | 29 | 32 | 34 | 38 | 28 | 30 | 33 |
| | Mi-Ht | 36 | 36 | 34 | 36 | | 32 | 33 | 36 | 34 | 35 | 36 | 32 | 35 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------------|
| Poteau 6-D | Bas | 33 | 35 | 29 | 33 | 31 | / | 29 | 31 | / | 35 | / | 30 | 33 |
| | Mi-Ht | 43 | | 39 | 42 | 42 | 40 | 39 | 38 | 40 | / | 43 | 37 | 40 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 4-D | Bas | 38 | 36 | 42 | 42 | 43 | 43 | 40 | 41 | 44 | 40 | 40 | 39 | 41 |
| | Mi-Ht | 30 | 31 | 36 | 34 | 30 | / | 39 | 36 | 35 | 33 | / | 39 | 35 |
| | Haut | 33 | 29 | 39 | 38 | / | 35 | 32 | 28 | 31 | 31 | 30 | 35 | 32 |
| Poteau 3-D | Bas | 45 | / | 42 | 40 | 40 | 34 | 40 | 36 | 34 | 39 | 40 | 41 | 40 |
| | Mi-Ht | / | 34 | 35 | / | 37 | 40 | 39 | 40 | 40 | 42 | 43 | 42 | 40 |
| | Haut | 36 | 36 | 42 | 42 | 41 | 41 | 40 | 42 | 40 | 38 | 40 | 41 | 41 |
| RDC | | | | | | | | | | | | | | Ind,med |
| Poteau 3-A | Bas | 41 | 38 | / | 41 | 40 | 38 | 40 | 42 | 42 | 41 | 42 | 42 | 41 |
| | Mi-Ht | 36 | 33 | 35 | 40 | 40 | 35 | 36 | 42 | 39 | 34 | / | 36 | 36 |
| | Haut | 34 | 34 | 39 | 38 | 39 | 45 | 36 | 40 | 34 | 38 | 37 | 38 | 38 |
| Poteau 4-A | Bas | 32 | 37 | 34 | 35 | 35 | 34 | 41 | / | 32 | 35 | / | 34 | 35 |
| | Mi-Ht | 42 | 35 | 39 | 37 | 41 | 41 | 40 | 39 | 41 | 34 | 42 | 34 | 40 |
| | Haut | 36 | 32 | 35 | 36 | 32 | 31 | 30 | 34 | 31 | 38 | 33 | 30 | 33 |
| Poteau 6-A | Bas | / | 28 | 28 | 26 | 24 | 24 | 23 | 30 | 30 | 25 | 28 | 24 | 26 |
| | Mi-Ht | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 33 | 24 | 30 | 25 | 25 | 28 | 27 | 27 |
| | Haut | 32 | 29 | 29 | 27 | 28 | 28 | 24 | 24 | 25 | 26 | 25 | 27 | 27 |
| Poteau 8-A | Bas | 43 | 40 | 40 | 36 | 34 | 34 | 34 | 43 | 37 | 34 | 34 | 39 | 37 |
| | Mi-Ht | 42 | 37 | / | 43 | 43 | 40 | 41 | 42 | 43 | 41 | 38 | 39 | 41 |
| | Haut | 39 | 36 | 39 | 38 | 40 | 40 | 38 | 40 | 42 | 38 | 38 | 35 | 39 |
| Poteau 9-A | Bas | 44 | 43 | 46 | 48 | 47 | 43 | 43 | 43 | 45 | 44 | 47 | 42 | 44 |
| | Mi-Ht | 40 | 43 | 40 | 42 | 40 | 43 | 46 | 38 | 42 | 44 | 42 | 43 | 42 |
| | Haut | 33 | 39 | 42 | 39 | 39 | 31 | 31 | 36 | 33 | 40 | 33 | 40 | 38 |
| Poteau 9-B | Bas | 31 | 28 | 26 | / | 27 | 26 | 27 | 27 | 29 | 34 | 31 | / | 28 |
| | Mi-Ht | 33 | 30 | 27 | 26 | 32 | 28 | 26 | 27 | 29 | 29 | 29 | 26 | 29 |
| | Haut | 30 | 31 | 29 | 32 | 36 | 33 | 35 | 29 | 28 | 30 | 31 | 29 | 31 |
| Poteau 8-B | Bas | 31 | 26 | 29 | 30 | 26 | 30 | 32 | 34 | 29 | 25 | 26 | 29 | 29 |
| | Mi-Ht | 27 | 26 | 32 | 33 | 32 | 28 | 27 | 26 | 24 | 26 | 34 | 32 | 28 |
| | Haut | 30 | 28 | 28 | 30 | 30 | 30 | 28 | 28 | 26 | 28 | 30 | 24 | 28 |
| Poteau 6-B | Bas | 29 | 39 | 27 | 26 | 27 | 32 | 31 | 25 | 33 | 33 | 33 | 29 | 30 |
| | Mi-Ht | 33 | 27 | 32 | 26 | 26 | 34 | 34 | 27 | 28 | 34 | 26 | 28 | 28 |
| | Haut | 25 | 31 | 24 | 30 | 24 | 29 | 28 | 30 | 28 | 25 | 25 | 25 | 27 |
| Poteau 4-B | Bas | 25 | 25 | 25 | 26 | 28 | 26 | 24 | 25 | 29 | 25 | 26 | 26 | 26 |
| | Mi-Ht | 33 | 26 | 31 | 28 | 30 | 25 | 26 | 26 | 30 | 30 | 27 | 26 | 28 |
| | Haut | 22 | 22 | 22 | 24 | 22 | 22 | 22 | 28 | 26 | 24 | 24 | 24 | 23 |
| Poteau 3-B | Bas | 34 | 32 | 37 | 30 | 31 | 31 | 32 | 28 | 32 | 31 | 34 | 33 | 32 |
| | Mi-Ht | 32 | 26 | 27 | 25 | 29 | 29 | 27 | 26 | 27 | 31 | 26 | 26 | 27 |
| | Haut | 25 | 24 | 23 | 24 | 24 | 26 | 26 | 22 | 27 | 23 | 20 | 18 | 24 |
| Poteau 3-C | Bas | 35 | 34 | 29 | 32 | 32 | 30 | 30 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 30 |
| | Mi-Ht | 30 | 29 | 33 | 34 | 27 | 33 | 27 | 31 | 29 | 26 | 28 | 28 | 29 |
| | Haut | 27 | 26 | 30 | 29 | 24 | 29 | 31 | 29 | 28 | 25 | 26 | 32 | 29 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|
| Poteau 4-C | Bas | 30 | 29 | 27 | 27 | 29 | 25 | 27 | 32 | 29 | 27 | 26 | 30 | 28 |
| | Mi-Ht | 30 | 28 | 28 | 32 | 34 | 31 | 30 | 28 | 32 | 30 | 30 | 27 | 30 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 6-C | Bas | 31 | 26 | 27 | 32 | 31 | 33 | 29 | 30 | 30 | 28 | 27 | 30 | 30 |
| | Mi-Ht | 30 | 26 | 32 | 31 | 33 | 33 | 28 | 29 | 26 | 28 | 30 | 28 | 30 |
| | Haut | 26 | 33 | 24 | 24 | 27 | 28 | 26 | 26 | 25 | 24 | 32 | 26 | 26 |
| Poteau 8-C | Bas | 30 | 27 | 27 | 30 | 28 | 28 | 27 | 25 | 31 | 32 | 26 | 29 | 28 |
| | Mi-Ht | 30 | 36 | 32 | 33 | 36 | 31 | 26 | 28 | 33 | 32 | 27 | 34 | 32 |
| | Haut | 28 | 33 | 29 | 30 | 33 | 28 | 30 | 29 | 34 | 30 | 29 | 28 | 30 |
| Poteau 9-C | Bas | 39 | 34 | 35 | 33 | 32 | 32 | 34 | 33 | 40 | 42 | 32 | 36 | 34 |
| | Mi-Ht | 30 | 31 | 32 | 36 | 36 | 32 | 34 | 31 | 39 | 34 | 31 | 35 | 33 |
| | Haut | 34 | 28 | 27 | 27 | 30 | 26 | 25 | 29 | 26 | 34 | 28 | 32 | 28 |
| Poteau 9-D | Bas | 39 | 34 | 35 | 33 | 32 | 32 | 34 | 33 | 40 | | 32 | 36 | 34 |
| | Mi-Ht | 35 | 37 | 36 | 32 | 33 | 34 | 34 | 32 | 40 | 33 | 34 | 30 | 34 |
| | Haut | 35 | 33 | 40 | 41 | 34 | 35 | 42 | 39 | 39 | 33 | 34 | 32 | 35 |
| Poteau 8-D | Bas | 31 | 28 | 28 | 31 | 33 | 32 | 28 | 28 | 30 | 37 | 35 | 34 | 31 |
| | Mi-Ht | 26 | 27 | 24 | 30 | 28 | 28 | 27 | 27 | 25 | 30 | 28 | 25 | 27 |
| | Haut | 20 | 20 | 20 | 22 | 23 | 22 | 23 | 22 | 23 | 21 | 21 | 21 | 22 |
| Poteau 6-D | Bas | 32 | 27 | 29 | 26 | 31 | 30 | 30 | 25 | 27 | 30 | 35 | 30 | 30 |
| | Mi-Ht | 27 | 29 | 30 | 27 | 26 | 24 | 26 | 28 | 28 | 27 | 31 | 25 | 27 |
| | Haut | 31 | 27 | 26 | 24 | 26 | 25 | 23 | 25 | 23 | 24 | 20 | 20 | 25 |
| Poteau 4-D | Bas | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | Mi-Ht | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | Haut | 26 | 23 | 25 | 24 | 26 | 27 | 29 | 26 | 24 | 24 | 28 | 26 | 26 |
| Poteau 3-D | Bas | 28 | 31 | 26 | 28 | 26 | 25 | 26 | 28 | 26 | 26 | 26 | 28 | 26 |
| | Mi-Ht | 29 | 29 | 27 | 27 | 30 | 30 | 30 | 30 | 26 | 26 | 27 | 30 | 29 |
| | Haut | | | | | | | | | | | | | ##### |

Poteaux (bloc B)

| Niveau 1 | | | | | | | | | | | | | | | Ind,med |
|------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|
| Poteau 1-E | Bas | 32 | 33 | 31 | 31 | 43 | 40 | 46 | 42 | 42 | 42 | 41 | 42 | 42 | |
| | Mi-Ht | 45 | 50 | 42 | 51 | 44 | 41 | 39 | 51 | 42 | 44 | 47 | 42 | 44 | |
| | Haut | 40 | 40 | 36 | 42 | 41 | 40 | 36 | 41 | 38 | 34 | 38 | 38 | 39 | |
| Poteau 2-E | Bas | 46 | 42 | 43 | 45 | 42 | 42 | 36 | 42 | 43 | 48 | 42 | 42 | 42 | |
| | Mi-Ht | 42 | 43 | 46 | 47 | 42 | 41 | 38 | 44 | 47 | 40 | 42 | 44 | 43 | |
| | Haut | 35 | 35 | 33 | 39 | 34 | 39 | 34 | 31 | 32 | 33 | 32 | 34 | 34 | |
| Poteau 3-E | Bas | 40 | 30 | 32 | 38 | 40 | 41 | 40 | 42 | 44 | 43 | 30 | 39 | 40 | |
| | Mi-Ht | 32 | 37 | 35 | 38 | 39 | 34 | 32 | 32 | 35 | 31 | 36 | 41 | 35 | |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | |
| Poteau 4-E | Bas | 34 | 42 | 37 | 34 | 42 | 40 | 36 | 35 | 41 | 35 | 38 | 37 | 37 | |
| | Mi-Ht | 40 | 41 | 42 | 39 | 37 | 41 | 37 | 43 | 35 | 40 | 45 | 42 | 41 | |
| | Haut | 34 | 38 | 38 | 35 | 30 | 37 | 38 | 38 | 40 | 37 | 41 | 35 | 38 | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Poteau 6-E | Bas | 33 | 38 | 32 | 32 | 37 | 31 | 35 | 30 | 34 | 38 | 33 | 33 | 33 |
| | Mi-Ht | 31 | 40 | 34 | 43 | 34 | 36 | 45 | 36 | 31 | 40 | 40 | 37 | 37 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 8-E | Bas | 33 | 35 | 36 | 34 | 35 | 32 | 37 | 30 | 36 | 33 | 39 | 39 | 35 |
| | Mi-Ht | 35 | 36 | 34 | 31 | 31 | 36 | 36 | 32 | 30 | 33 | 36 | 36 | 35 |
| | Haut | 38 | 34 | 32 | 33 | 34 | 32 | 28 | 32 | 31 | 31 | 30 | 33 | 32 |
| Poteau 9-E | Bas | 36 | 36 | 32 | 33 | 36 | 34 | 35 | 32 | 33 | 37 | 39 | 34 | 35 |
| | Mi-Ht | 39 | 40 | 33 | 33 | 37 | 31 | 33 | 32 | 28 | 30 | 34 | 35 | 33 |
| | Haut | 27 | 34 | 31 | 30 | 31 | 35 | 31 | 36 | 32 | 34 | 32 | 32 | 32 |
| Poteau 9-F | Bas | 42 | 45 | 45 | 42 | 42 | 40 | 42 | 42 | 43 | 44 | 42 | 38 | 42 |
| | Mi-Ht | 43 | 45 | 41 | 44 | 43 | 42 | 43 | 45 | 42 | 47 | 45 | 49 | 44 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 8-F | Bas | 42 | 45 | 41 | 39 | 40 | 42 | 39 | 40 | 41 | 43 | 44 | 42 | 42 |
| | Mi-Ht | 44 | 42 | 41 | 42 | 43 | 48 | 45 | 50 | 51 | 47 | 48 | 48 | 46 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 6-F | Bas | 40 | 43 | 40 | 29 | 36 | 39 | 37 | 35 | 43 | 42 | 36 | 43 | 40 |
| | Mi-Ht | 35 | 37 | 43 | 35 | 43 | 31 | 38 | 38 | 42 | 43 | 31 | 37 | 38 |
| | Haut | 33 | 34 | 34 | 28 | 36 | 31 | 29 | 30 | 35 | 35 | 36 | 32 | 34 |
| Poteau 4-F | Bas | 40 | 36 | 38 | 37 | 38 | 36 | 40 | 35 | 35 | 35 | 37 | 42 | 37 |
| | Mi-Ht | 36 | 36 | 39 | 40 | 41 | 40 | 41 | 43 | 32 | 41 | 40 | 40 | 40 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 3-F | Bas | 35 | 33 | 43 | 38 | 36 | 36 | 40 | 34 | 34 | 42 | 40 | 36 | 36 |
| | Mi-Ht | 32 | 35 | 36 | 40 | 41 | 33 | 35 | 46 | 32 | 38 | 33 | 34 | 35 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 2-F | Bas | 45 | 42 | 40 | 42 | 36 | 37 | 40 | 40 | 44 | 38 | 37 | 39 | 40 |
| | Mi-Ht | 43 | 40 | 35 | 38 | 42 | 37 | 37 | 37 | 34 | 42 | 39 | 34 | 38 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 1-F | Bas | 46 | 45 | 42 | 39 | 37 | 38 | 38 | 34 | 40 | 40 | 32 | 40 | 40 |
| | Mi-Ht | 47 | 49 | 41 | 45 | 50 | 44 | 46 | 42 | 41 | 46 | 39 | 44 | 45 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 1-H | Bas | 39 | 33 | 41 | 35 | 41 | 40 | 33 | 32 | 35 | 41 | 33 | 36 | 36 |
| | Mi-Ht | 41 | 36 | 38 | 42 | 43 | 42 | 44 | 38 | 37 | 40 | 39 | 35 | 40 |
| | Haut | 38 | 38 | 40 | 40 | 38 | 40 | 35 | 31 | 41 | 43 | 33 | 41 | 39 |
| Poteau 2-H | Bas | 38 | 37 | 31 | 36 | 39 | 35 | 36 | 36 | 40 | 33 | 43 | 41 | 37 |
| | Mi-Ht | 40 | 34 | 39 | 38 | 35 | 41 | 35 | 41 | 37 | 35 | 43 | 39 | 39 |
| | Haut | 36 | 35 | 38 | 35 | 34 | 32 | 40 | 40 | 30 | 40 | 36 | 32 | 36 |
| Poteau 3-H | Bas | 37 | 41 | 32 | 30 | 44 | 41 | 37 | 36 | 34 | 31 | 37 | 36 | 37 |
| | Mi-Ht | 33 | 36 | 44 | 40 | 41 | 42 | 36 | 35 | 35 | 37 | 41 | 37 | 37 |
| | Haut | 34 | 34 | 38 | 30 | 36 | 38 | 34 | 40 | 40 | 32 | 32 | 38 | 35 |
| Poteau 4-H | Bas | 38 | 39 | 40 | 42 | 33 | 37 | 37 | 37 | 42 | 33 | 35 | 36 | 37 |
| | Mi-Ht | 38 | 33 | 36 | 36 | 36 | 45 | 41 | 40 | 39 | 42 | 42 | 41 | 40 |
| | Haut | 33 | 35 | 35 | 34 | 33 | 31 | 33 | 37 | 30 | 32 | 35 | 30 | 33 |
| Poteau 6-H | Bas | 40 | 31 | 34 | 35 | 39 | 32 | 33 | 32 | 36 | 35 | 40 | 38 | 35 |
| | Mi-Ht | 38 | 33 | 32 | 37 | 36 | 34 | 28 | 33 | 35 | 30 | 35 | 31 | 34 |
| | Haut | 37 | 33 | 31 | 34 | 32 | 32 | 30 | 31 | 30 | 31 | 32 | 31 | 32 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------------------------|
| Poteau 8-H | Bas | 30 | 33 | 43 | 35 | 39 | 40 | 35 | 37 | 35 | 37 | 36 | 36 | 36 |
| | Mi-Ht | 35 | 34 | 34 | 34 | 38 | 34 | 42 | 32 | 37 | 32 | 38 | 36 | 35 |
| | Haut | 28 | 27 | 28 | 33 | 30 | 29 | 30 | 27 | 34 | 29 | 29 | 30 | 29 |
| Poteau 8-I | Bas | 36 | 42 | 40 | 42 | 40 | 32 | 36 | 35 | 36 | 39 | 38 | 47 | 39 |
| | Mi-Ht | 40 | 34 | 36 | 34 | 37 | 40 | 44 | 40 | 42 | 42 | 42 | 46 | 40 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 6-I | Bas | 46 | 45 | 34 | 44 | 38 | 42 | 35 | 42 | 39 | 41 | 41 | 35 | 41 |
| | Mi-Ht | 40 | 40 | 40 | 39 | 42 | 37 | 42 | 40 | 37 | 41 | 42 | 42 | 40 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 4-I | Bas | 31 | 32 | 40 | 40 | 38 | 42 | 38 | 38 | 39 | 38 | 38 | 41 | 38 |
| | Mi-Ht | 35 | 42 | 36 | 38 | 33 | 32 | 42 | 44 | 29 | 36 | 30 | 29 | 36 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 3-I | Bas | 31 | 36 | 42 | 47 | 41 | 39 | 46 | 38 | 39 | 41 | 40 | 42 | 41 |
| | Mi-Ht | 40 | 37 | 35 | 37 | 36 | 35 | 40 | 40 | 38 | 39 | 38 | 40 | 38 |
| | Haut | 35 | 32 | 36 | 31 | 34 | 39 | 34 | 30 | 33 | 34 | 37 | 34 | 34 |
| Poteau 2-I | Bas | 45 | 40 | 42 | 43 | 45 | 40 | 48 | 47 | 40 | 48 | 44 | 43 | 44 |
| | Mi-Ht | 40 | 39 | 40 | 42 | 40 | 39 | 40 | 42 | 40 | 41 | 38 | 38 | 40 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 1-I | Bas | 41 | 35 | 39 | 40 | 39 | 40 | 35 | 35 | 33 | 30 | 38 | 35 | 37 |
| | Mi-Ht | 39 | 36 | 29 | 40 | 45 | 41 | 36 | 40 | 36 | 38 | 40 | 35 | 39 |
| | Haut | 41 | 46 | 36 | 40 | 35 | 42 | 36 | 35 | 34 | 35 | 34 | 40 | 36 |
| RDC | | | | | | | | | | | | | | Ind,me d zone |
| Poteau 1-E | Bas | 30 | 34 | 37 | 38 | 38 | 33 | 33 | 34 | 34 | 39 | 37 | 38 | 36 |
| | Mi-Ht | 34 | 40 | 42 | 40 | 41 | 43 | 36 | 38 | 40 | 39 | 39 | 36 | 40 |
| | Haut | 31 | 29 | 29 | 30 | 28 | 38 | 32 | 30 | 30 | 34 | 33 | 29 | 30 |
| Poteau 2-E | Bas | 38 | 34 | 40 | 38 | 40 | 37 | 39 | 38 | 41 | 38 | | 42 | 38 |
| | Mi-Ht | 36 | 36 | 39 | 36 | 35 | 34 | 37 | 42 | 41 | 40 | 39 | 34 | 37 |
| | Haut | 31 | 30 | 29 | 30 | 29 | 30 | 32 | 31 | 33 | 31 | 35 | 33 | 31 |
| Poteau 3-E | Bas | 40 | 38 | 33 | 30 | 32 | 39 | 40 | 36 | 40 | 34 | 31 | 37 | 37 |
| | Mi-Ht | 31 | 33 | 34 | 31 | 30 | 31 | 31 | 31 | 36 | 35 | | 31 | 31 |
| | Haut | 28 | 26 | 22 | 29 | 26 | 24 | 28 | 30 | 33 | 31 | 25 | 26 | 27 |
| Poteau 4-E | Bas | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | Mi-Ht | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | Haut | 32 | 24 | 32 | 21 | 24 | 28 | 26 | 29 | 27 | 34 | 26 | 25 | 27 |
| Poteau 6-E | Bas | 26 | 27 | 33 | 23 | 26 | 28 | 27 | 28 | 32 | 25 | 31 | 26 | 27 |
| | Mi-Ht | 24 | 26 | 33 | 26 | 22 | 27 | 29 | 29 | 30 | 26 | 29 | 32 | 28 |
| | Haut | 30 | 33 | 36 | 33 | 34 | 34 | 30 | 30 | 37 | 30 | 30 | 30 | 32 |
| Poteau 8-E | Bas | 30 | 28 | 28 | 27 | 27 | 28 | 26 | 30 | 28 | 29 | 28 | 28 | 28 |
| | Mi-Ht | 29 | 28 | 30 | 32 | 32 | 29 | 26 | 31 | 31 | 33 | 27 | 26 | 30 |
| | Haut | 32 | 27 | 27 | 25 | 26 | 32 | 25 | 29 | 29 | 29 | 26 | 26 | 27 |
| Poteau 9-E | Bas | 32 | 34 | 33 | 35 | 40 | 33 | 40 | 34 | 38 | 42 | 33 | 40 | 35 |
| | Mi-Ht | 34 | 34 | 30 | 30 | 40 | 32 | 30 | 35 | 34 | 42 | 39 | 34 | 34 |
| | Haut | 26 | 30 | 28 | 25 | 24 | 26 | 25 | 29 | 24 | 28 | 23 | 27 | 26 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Poteau 9-F | Bas | 26 | 26 | 28 | 31 | 33 | 33 | 32 | 39 | 33 | 29 | 33 | 32 | 32 |
| | Mi-Ht | 29 | 28 | 29 | 34 | 30 | 30 | 36 | 34 | 33 | 32 | 31 | 31 | 31 |
| | Haut | 31 | 29 | 24 | 26 | 33 | 28 | 28 | 30 | 32 | 31 | 33 | 27 | 30 |
| Poteau 8-F | Bas | 32 | 29 | 29 | 27 | 29 | 32 | 32 | 28 | 35 | 33 | 30 | 33 | 31 |
| | Mi-Ht | 38 | 33 | 36 | 33 | 34 | 35 | 35 | 34 | 36 | 36 | 32 | 35 | 35 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 6-F | Bas | 37 | 37 | 33 | 34 | 38 | 39 | 39 | 39 | 39 | 35 | 37 | 38 | 38 |
| | Mi-Ht | 38 | 34 | 38 | 44 | 43 | 35 | 43 | 40 | 36 | 42 | 40 | 41 | 40 |
| | Haut | 33 | 31 | 30 | 34 | 36 | 30 | 30 | 30 | 31 | 32 | 32 | 31 | 31 |
| Poteau 4-F | Bas | 36 | 29 | 33 | 38 | 32 | 28 | 28 | 32 | 34 | 34 | 34 | 30 | 33 |
| | Mi-Ht | 38 | 42 | 40 | 40 | 32 | 38 | 36 | 35 | 39 | 34 | 38 | 36 | 38 |
| | Haut | 33 | 30 | 33 | 32 | 28 | 35 | 38 | 32 | 29 | 30 | 32 | 31 | 32 |
| Poteau 3-F | Bas | 38 | 37 | 39 | 37 | 36 | 41 | 33 | 32 | 30 | 39 | 42 | 37 | 37 |
| | Mi-Ht | 42 | 36 | 39 | 34 | 36 | 34 | 34 | 34 | 40 | 36 | 43 | 42 | 36 |
| | Haut | 29 | 28 | 34 | 34 | 39 | 39 | 35 | 32 | 38 | 33 | 39 | 33 | 34 |
| Poteau 2-F | Bas | 42 | 38 | 41 | 42 | 44 | 41 | 35 | / | 38 | 40 | 42 | 36 | 41 |
| | Mi-Ht | 36 | 35 | 34 | 42 | 44 | 40 | 35 | 36 | 38 | 37 | 37 | 35 | 37 |
| | Haut | 32 | 33 | 31 | 36 | 31 | 31 | 29 | 30 | 31 | 34 | 29 | 30 | 31 |
| Poteau 1-F | Bas | 32 | 31 | 33 | 33 | 37 | 34 | 39 | 39 | 39 | 37 | 35 | 34 | 35 |
| | Mi-Ht | 33 | 34 | 35 | 34 | 34 | 37 | 40 | 30 | 42 | 30 | 30 | 34 | 34 |
| | Haut | 34 | 32 | 36 | 34 | 38 | 38 | 31 | 39 | 36 | 30 | 35 | 38 | 36 |
| Poteau 1-H | Bas | 32 | 32 | 29 | 31 | 34 | 34 | 30 | 33 | 31 | 30 | 39 | 29 | 32 |
| | Mi-Ht | 34 | 40 | 40 | 33 | 39 | 32 | 36 | 36 | 33 | / | 34 | 33 | 34 |
| | Haut | 34 | 32 | 37 | 30 | 39 | 36 | 38 | 32 | 32 | 33 | 34 | 30 | 34 |
| Poteau 3-H | Bas | 42 | 36 | 39 | 44 | 40 | 44 | 39 | 45 | 44 | 42 | 42 | 42 | 42 |
| | Mi-Ht | 44 | 42 | 44 | 46 | 44 | 39 | 38 | 39 | 39 | 42 | 40 | 42 | 42 |
| | Haut | 35 | 38 | 39 | 38 | 40 | 36 | 36 | 34 | 40 | 36 | 38 | 39 | 38 |
| Poteau 4-H | Bas | 43 | 43 | 40 | 36 | 46 | 42 | 41 | 45 | 39 | 37 | 43 | 40 | 42 |
| | Mi-Ht | 35 | 40 | 43 | 40 | 36 | 40 | 38 | 43 | 36 | 41 | 39 | 36 | 40 |
| | Haut | 34 | 33 | 28 | 29 | 30 | 31 | 36 | 34 | 31 | 28 | 30 | 34 | 31 |
| Poteau 6-H | Bas | 38 | 29 | 29 | 40 | 31 | 35 | 38 | 35 | 32 | 33 | 37 | 30 | 34 |
| | Mi-Ht | 30 | 30 | 36 | 37 | 42 | 34 | 40 | 38 | 36 | 30 | 34 | 31 | 35 |
| | Haut | 30 | 28 | 30 | 27 | 29 | 30 | 32 | 31 | 35 | 27 | 30 | 30 | 30 |
| Poteau 8-H | Bas | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | Mi-Ht | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | Haut | 28 | 35 | 31 | 31 | 26 | 26 | 28 | 31 | 30 | 29 | 28 | 28 | 29 |
| Poteau 6-I | Bas | 34 | 31 | | 30 | 30 | 26 | 31 | 37 | / | 32 | 31 | 27 | 31 |
| | Mi-Ht | 35 | 37 | 33 | 33 | 33 | 32 | 30 | 33 | 30 | 32 | 35 | 34 | 33 |
| | Haut | 30 | 34 | 31 | 32 | 30 | 29 | 35 | 39 | 32 | 29 | 35 | 37 | 32 |
| Poteau 4-I | Bas | 39 | 35 | 34 | 40 | 32 | 34 | 32 | 34 | 35 | 34 | 39 | 39 | 35 |
| | Mi-Ht | 38 | 36 | 32 | 35 | 35 | 32 | 36 | 39 | 34 | 34 | 40 | 36 | 36 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poteau 3-I | Bas | 44 | 44 | 45 | 46 | 42 | 48 | 42 | 42 | 42 | / | 45 | 42 | 44 |
| | Mi-Ht | 43 | 42 | 42 | 42 | 47 | 46 | 42 | 45 | 40 | 41 | 41 | 43 | 42 |
| | Haut | 40 | 39 | 38 | 41 | 37 | 37 | 43 | 40 | 40 | 40 | 41 | 40 | 40 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------------|
| Poteau 2-I | Bas | 42 | 41 | 43 | 42 | 43 | 44 | 43 | 42 | 44 | 44 | 44 | 46 | 43 |
| | Mi-Ht | 42 | 40 | 42 | 50 | 49 | 45 | 37 | 37 | 45 | 42 | 37 | 40 | 42 |
| | Haut | 39 | 39 | 39 | 36 | 40 | 37 | 37 | 39 | 36 | 39 | 38 | 34 | 39 |
| Poteau 1-I | Bas | 29 | 29 | 30 | 29 | 35 | 28 | 33 | 29 | 29 | | 32 | 29 | 29 |
| | Mi-Ht | 34 | 35 | 32 | 38 | 33 | 35 | 34 | 39 | 31 | 38 | 32 | 36 | 35 |
| | Haut | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poutres (bloc A) | | | | | | | | | | | | | | |
| Niveau 2 | | | | | | | | | | | | | | Ind,med |
| Poutre A 3-4 | Gauche | 24 | 25 | 28 | 26 | 26 | 28 | 27 | 24 | 26 | 26 | 25 | 24 | 26 |
| | Mi-tr | 27 | 24 | 29 | 23 | 24 | 25 | 23 | 23 | 33 | 26 | 26 | 25 | 25 |
| | Droit | 33 | 28 | 28 | 27 | 29 | 26 | 26 | 27 | 23 | 27 | 28 | 30 | 28 |
| Poutre A 4-6 | Gauche | 25 | 24 | 28 | 28 | 25 | 29 | 25 | 27 | 26 | 24 | 25 | 24 | 25 |
| | Mi-tr | 24 | 23 | 26 | 27 | 26 | 27 | 25 | 23 | 25 | 23 | 24 | 23 | 25 |
| | Droit | 25 | 27 | 30 | 28 | 28 | 30 | 29 | 28 | 28 | 29 | 30 | 30 | 29 |
| Poutre A 6-8 | Gauche | 27 | 23 | 24 | 25 | 26 | 25 | 26 | 31 | | 26 | 24 | 32 | 26 |
| | Mi-tr | 31 | 28 | 29 | 30 | 26 | 28 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 30 | 28 |
| | Droit | 30 | 27 | 27 | 31 | 27 | 24 | 30 | 25 | 29 | 32 | 29 | 27 | 28 |
| Poutre A 8-9 | Gauche | 25 | 21 | 28 | 27 | 27 | 27 | 28 | 28 | 29 | 26 | 24 | 23 | 27 |
| | Mi-tr | 31 | 28 | 23 | 24 | 30 | 30 | 25 | 27 | 31 | 29 | 29 | 30 | 29 |
| | Droit | 24 | 24 | 26 | 26 | 25 | 32 | 33 | 33 | 27 | 27 | 26 | 27 | 27 |
| Poutre B 8-9 | Gauche | 21 | 29 | 35 | 33 | 34 | 24 | 28 | 29 | 28 | 31 | 34 | 26 | 29 |
| | Mi-tr | 23 | 23 | 24 | 25 | 25 | 27 | / | 27 | 30 | 20 | 20 | 24 | 24 |
| | Droit | 22 | 26 | 24 | 24 | 29 | 28 | 32 | 29 | 31 | 27 | 30 | 30 | 29 |
| Poutre B 6-8 | Gauche | 26 | 27 | 25 | 25 | 21 | 28 | 24 | 23 | 25 | 28 | 27 | 24 | 25 |
| | Mi-tr | 28 | 34 | 27 | 24 | 23 | 29 | 25 | 26 | 23 | 24 | 24 | 30 | 26 |
| | Droit | 34 | 34 | 40 | 33 | 30 | 26 | 30 | 26 | 34 | 30 | 34 | 26 | 32 |
| Poutre B 4-6 | Gauche | 26 | 24 | 24 | 30 | 26 | 24 | 24 | 23 | 25 | 23 | 23 | 23 | 24 |
| | Mi-tr | 23 | 24 | 27 | 30 | 26 | 32 | 21 | 25 | 27 | 25 | 27 | 24 | 26 |
| | Droit | 32 | 31 | 29 | 30 | 27 | 30 | 30 | 31 | 31 | 29 | 28 | 29 | 30 |
| Poutre B 3-4 | Gauche | 30 | 24 | 29 | 26 | 34 | 28 | 30 | 26 | 27 | 28 | 28 | 27 | 28 |
| | Mi-tr | 23 | 27 | 26 | 24 | 21 | 23 | 20 | 23 | 25 | 24 | 22 | 24 | 24 |
| | Droit | 24 | 23 | 20 | 26 | 28 | 27 | 21 | 28 | 25 | 24 | 22 | 28 | 25 |
| Poutre C 3-4 | Gauche | 27 | 28 | 29 | 23 | 30 | 25 | 29 | 31 | 29 | 29 | 30 | 26 | 29 |
| | Mi-tr | 28 | 27 | 30 | 30 | 27 | 29 | 26 | 28 | 30 | 26 | 27 | 27 | 28 |
| | Droit | 26 | 34 | 31 | 34 | 30 | 29 | 33 | 28 | 24 | 28 | 31 | 27 | 30 |
| Poutre C 6-8 | Gauche | 30 | 32 | 33 | 26 | 31 | 33 | 28 | 28 | 29 | 29 | 30 | 28 | 30 |
| | Mi-tr | 26 | 23 | 22 | 24 | 28 | 24 | 23 | 25 | 25 | 26 | 23 | 22 | 24 |
| | Droit | 24 | 25 | 26 | 25 | 27 | 30 | 29 | 26 | 27 | 29 | 26 | 24 | 26 |
| Poutre C 8-9 | Gauche | 26 | 24 | 27 | 26 | 29 | 29 | 24 | 26 | 29 | 27 | 26 | 26 | 26 |
| | Mi-tr | 33 | 34 | 32 | 30 | 34 | 34 | 33 | 30 | 34 | 30 | 35 | 31 | 33 |
| | Droit | 27 | 28 | 26 | 26 | 27 | 30 | 26 | 25 | 23 | 28 | 27 | 26 | 27 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------------|
| Poutre D 8-9 | Gauche | 28 | 34 | 39 | 36 | 30 | 32 | 31 | 31 | 29 | 31 | 29 | 30 | 31 |
| | Mi-tr | 27 | 32 | 24 | 25 | 30 | 30 | 25 | 25 | 28 | 25 | 26 | 29 | 27 |
| | Droit | 27 | 25 | 23 | 23 | 25 | 22 | 24 | 25 | 24 | 24 | 24 | 23 | 24 |
| Poutre D 6-8 | Gauche | 26 | 30 | 31 | 30 | 30 | 29 | 27 | 27 | 26 | 32 | 33 | 26 | 30 |
| | Mi-tr | 25 | 34 | 29 | 32 | 30 | 32 | 34 | 34 | 29 | 24 | 26 | 26 | 30 |
| | Droit | 28 | 40 | 40 | 38 | 39 | 38 | 35 | 38 | 36 | 28 | 30 | 31 | 37 |
| Poutre D 3-4 | Gauche | 26 | 26 | 25 | 26 | 28 | 29 | 21 | 25 | 26 | 25 | 23 | 22 | 26 |
| | Mi-tr | 24 | 23 | 28 | 32 | 28 | 24 | 25 | 23 | 24 | 26 | 24 | 23 | 24 |
| | Droit | 23 | 23 | 25 | 29 | 26 | 26 | 30 | 26 | 29 | 25 | 27 | 28 | 26 |
| Niveau 1 | | | | | | | | | | | | | | Ind,med |
| Poutre B 8-9 | Gauche | 28 | 33 | 31 | 29 | 34 | 34 | 34 | 35 | 33 | 33 | 35 | 32 | 33 |
| | Mi-tr | 36 | 33 | 30 | 32 | 29 | 36 | 29 | 35 | 31 | 32 | 32 | 32 | 32 |
| | Droit | 36 | 34 | 29 | 28 | 34 | 29 | 32 | 30 | 32 | 29 | 33 | 30 | 31 |
| Poutre B 6-8 | Gauche | 34 | 40 | 34 | 34 | 36 | 31 | 33 | 33 | 32 | 32 | 36 | 36 | 34 |
| | Mi-tr | 36 | 34 | 34 | 32 | 33 | 34 | 31 | 35 | 32 | 36 | 36 | 32 | 34 |
| | Droit | 32 | 34 | 30 | 35 | 31 | 34 | 37 | 36 | 32 | 30 | 32 | 32 | 32 |
| Poutre B 4-6 | Gauche | 44 | 40 | 39 | 40 | 40 | 40 | 40 | 39 | 42 | 44 | 44 | 40 | 40 |
| | Mi-tr | 38 | 41 | 46 | 42 | 45 | 42 | 41 | 38 | 41 | 38 | 43 | 38 | 41 |
| | Droit | 34 | 38 | 33 | 37 | 40 | 39 | 34 | 34 | 40 | 40 | 36 | 33 | 37 |
| Poutre B 3-4 | Gauche | 32 | 32 | 32 | 34 | 33 | 30 | 28 | 32 | 31 | 31 | 37 | 29 | 32 |
| | Mi-tr | 34 | 38 | 38 | 38 | 38 | 37 | 38 | 40 | 37 | 36 | 39 | 37 | 38 |
| | Droit | 29 | 37 | 33 | 32 | 31 | 37 | 36 | 36 | 33 | 33 | 31 | 32 | 33 |
| Poutre C 3-4 | Gauche | 32 | 39 | 37 | 33 | 33 | 39 | 33 | 32 | 33 | 36 | 37 | 33 | 33 |
| | Mi-tr | 34 | 38 | 40 | 39 | 32 | 39 | 37 | 38 | 38 | 35 | 35 | 34 | 38 |
| | Droit | 31 | 33 | 31 | 32 | 32 | 31 | 32 | 32 | 30 | 30 | 31 | 32 | 32 |
| Poutre C 6-8 | Gauche | 29 | 29 | 27 | 30 | 33 | 30 | 32 | 29 | 31 | 31 | 30 | 29 | 30 |
| | Mi-tr | 35 | 35 | 33 | 34 | 37 | 37 | 37 | 37 | 31 | 34 | 35 | 30 | 35 |
| | Droit | 39 | 33 | 35 | 38 | 34 | 42 | 39 | 36 | 35 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Poutre C 8-9 | Gauche | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | Mi-tr | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | Droit | 36 | 44 | 37 | 38 | 29 | 36 | 36 | 31 | 32 | 32 | 31 | 37 | 36 |
| RDC | | | | | | | | | | | | | | Ind,med |
| Poutre B 8-9 | Gauche | 38 | 33 | 34 | 36 | 33 | 39 | 36 | 35 | 33 | 38 | 37 | 39 | 36 |
| | Mi-tr | 34 | 32 | 40 | 38 | 34 | 34 | 36 | 34 | 39 | 38 | 33 | 35 | 35 |
| | Droit | 30 | 35 | 32 | 33 | 35 | 34 | 31 | 33 | 34 | 34 | 35 | 39 | 34 |
| Poutre B 6-8 | Gauche | 36 | 35 | 34 | 36 | 37 | 37 | 36 | 34 | 32 | 34 | 36 | 35 | 36 |
| | Mi-tr | 36 | 39 | 39 | 39 | 42 | 37 | 36 | 38 | 43 | 41 | 37 | 43 | 39 |
| | Droit | 43 | 44 | 40 | 37 | 39 | 38 | 43 | 34 | 37 | 40 | 41 | 43 | 40 |
| Poutre B 4-6 | Gauche | 32 | 29 | 27 | 27 | 26 | 30 | 29 | 27 | 29 | 28 | 26 | 25 | 28 |
| | Mi-tr | 37 | 40 | 34 | 32 | 42 | 39 | 34 | 38 | 30 | 39 | 40 | 36 | 38 |
| | Droit | 30 | 30 | 36 | 38 | 33 | 41 | 31 | 31 | 35 | 39 | 34 | 38 | 35 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Poutre B 3-4 | Gauche | 27 | 29 | 34 | 34 | 32 | 31 | 34 | 28 | 32 | 32 | 30 | 31 | 32 |
| | Mi-tr | 31 | 31 | 31 | 29 | 32 | 33 | 39 | 34 | 34 | 30 | 31 | 30 | 31 |
| | Droit | 33 | 33 | 36 | 36 | 37 | 37 | 37 | 38 | 40 | 34 | 38 | 33 | 37 |
| Poutre C 3-4 | Gauche | 38 | 33 | 34 | 33 | 34 | 34 | 36 | 33 | 36 | 38 | 38 | 39 | 35 |
| | Mi-tr | 32 | 36 | 29 | 28 | 33 | 38 | 32 | 33 | 34 | 33 | 31 | 35 | 33 |
| | Droit | 35 | 33 | 30 | 29 | 27 | 35 | 35 | 39 | 32 | 31 | 38 | 35 | 34 |
| Poutre C 6-8 | Gauche | 39 | 34 | 44 | 34 | 36 | 43 | 38 | 40 | 39 | 32 | 38 | 46 | 39 |
| | Mi-tr | 34 | 39 | 41 | 33 | 39 | 38 | 37 | 35 | 39 | 35 | 39 | 33 | 38 |
| | Droit | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poutre C 8-9 | Gauche | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | Mi-tr | 34 | 43 | 39 | 38 | 43 | 39 | 43 | 46 | 43 | 45 | 43 | 44 | 43 |
| | Droit | 36 | 43 | 41 | 37 | 36 | 48 | 37 | 37 | 36 | 43 | 44 | 30 | 37 |

Poutres (bloc B)

| Niveau 1 | | | | | | | | | | | | | | Ind,med |
|--------------|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|
| Poutre F 1-2 | Gauche | 38 | 35 | 36 | 38 | 38 | 36 | 36 | 36 | 34 | 35 | 38 | 36 | 36 |
| | Mi-tr | 36 | 34 | 34 | 38 | 33 | 33 | 34 | 34 | 37 | 36 | 32 | 33 | 34 |
| | Droit | 34 | 38 | 34 | 36 | 35 | 40 | 35 | 31 | 35 | 33 | 32 | 36 | 35 |
| Poutre F 2-3 | Gauche | 38 | 37 | 42 | 34 | 35 | 32 | 32 | 32 | 38 | 34 | 35 | 36 | 35 |
| | Mi-tr | 32 | 40 | 37 | 42 | 38 | 37 | 38 | 36 | 36 | 33 | 36 | 32 | 37 |
| | Droit | 33 | 35 | 38 | 30 | 34 | 32 | 32 | 38 | 32 | 34 | 42 | 44 | 34 |
| Poutre F 4-6 | Gauche | 36 | 39 | 40 | 38 | 37 | 37 | 39 | 38 | 38 | 35 | 39 | 38 | 38 |
| | Mi-tr | 32 | 34 | 34 | 34 | 36 | 39 | 42 | 37 | 38 | 36 | 34 | 40 | 36 |
| | Droit | 36 | 36 | 34 | 33 | 39 | 37 | 42 | 38 | 41 | 36 | 38 | 30 | 37 |
| Poutre H 1-2 | Gauche | 34 | 38 | 39 | 38 | 36 | 38 | 35 | 37 | 38 | 36 | 38 | 39 | 38 |
| | Mi-tr | 40 | 39 | 36 | 40 | 34 | 37 | 36 | 33 | 35 | 36 | 39 | 35 | 36 |
| | Droit | 34 | 33 | 35 | 35 | 34 | 33 | 31 | 34 | 29 | 34 | 32 | 38 | 34 |
| Poutre H 2-3 | Gauche | 38 | 38 | 42 | 40 | 39 | 37 | 42 | 40 | 39 | 34 | 38 | 40 | 39 |
| | Mi-tr | 38 | 40 | 35 | 32 | 36 | 39 | 36 | 38 | 34 | 38 | 37 | 38 | 38 |
| | Droit | 44 | 44 | 48 | 44 | 39 | 42 | 42 | 39 | 40 | 50 | 42 | 44 | 43 |
| Poutre H 3-4 | Gauche | 34 | 38 | 34 | 36 | 39 | 36 | 36 | 38 | 36 | 36 | 35 | 40 | 36 |
| | Mi-tr | 42 | 42 | 38 | 35 | 36 | 37 | 34 | 39 | 41 | 36 | 39 | 35 | 38 |
| | Droit | 35 | 45 | 45 | 42 | 41 | 41 | 40 | 43 | 43 | 49 | 40 | 40 | 42 |
| Poutre H 4-6 | Gauche | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | Mi-tr | 39 | 34 | 38 | 34 | 36 | 39 | 40 | 32 | 34 | 36 | 38 | 38 | 37 |
| | Droit | 37 | 38 | 37 | 34 | 40 | 37 | 38 | 38 | 34 | 34 | 36 | 36 | 37 |
| Poutre H 6-8 | Gauche | 40 | 38 | 39 | 39 | 38 | 40 | 41 | 40 | 42 | 41 | 39 | 43 | 40 |
| | Mi-tr | 41 | 39 | 41 | 41 | 40 | 40 | 44 | 41 | 40 | 42 | 41 | 43 | 41 |
| | Droit | 39 | 42 | 43 | 38 | 40 | 38 | 40 | 43 | 45 | 38 | 38 | 42 | 40 |

| RDC | | | | | | | | | | | | | | Ind,med |
|--------------|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|
| | | | | | | | | | | | | | | |
| Poutre F 1-2 | Gauche | 31 | 32 | 35 | 31 | 31 | 30 | 33 | 30 | 30 | 32 | 30 | 30 | 31 |
| | Mi-tr | 37 | 38 | 40 | 37 | 35 | 39 | 41 | 41 | 39 | 36 | 37 | 34 | 38 |
| | Droit | 41 | 36 | 35 | 38 | 36 | 34 | 39 | 35 | 32 | 36 | 40 | 34 | 36 |
| Poutre F 2-3 | Gauche | 30 | 34 | 30 | 31 | 29 | 29 | 34 | 32 | 30 | 34 | 31 | 33 | 31 |
| | Mi-tr | 36 | 30 | 32 | 41 | 37 | 32 | 33 | 39 | 34 | 33 | 34 | 36 | 34 |
| | Droit | 36 | 36 | 32 | 31 | 34 | 30 | 33 | 32 | 36 | 38 | 36 | 30 | 34 |
| Poutre F 4-6 | Gauche | 33 | 35 | 40 | 42 | 34 | 34 | 38 | 35 | 40 | 38 | 36 | 38 | 37 |
| | Mi-tr | 34 | 33 | 33 | 33 | 30 | 33 | 33 | 33 | 39 | 30 | 35 | 35 | 33 |
| | Droit | 37 | 33 | 40 | 39 | 37 | 37 | 35 | 38 | 38 | 37 | 38 | 36 | 37 |
| Poutre H 1-2 | Gauche | 31 | 35 | 34 | 35 | 37 | 37 | 38 | 35 | 32 | 32 | 32 | 33 | 35 |
| | Mi-tr | 40 | 40 | 38 | 39 | 38 | 33 | 30 | 37 | 35 | 37 | 33 | 33 | 37 |
| | Droit | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Poutre H 2-3 | Gauche | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| | Mi-tr | 40 | 36 | 32 | 36 | 40 | 37 | 36 | 35 | 34 | 32 | 39 | 37 | 36 |
| | Droit | 39 | 42 | 34 | 33 | 36 | 36 | 34 | 39 | 36 | 38 | 38 | 40 | 37 |
| Poutre H 3-4 | Gauche | 42 | 36 | 34 | 32 | 30 | 30 | 32 | 34 | 34 | 36 | 33 | 41 | 34 |
| | Mi-tr | 36 | 39 | 33 | 44 | 32 | 35 | 41 | 37 | 36 | 34 | 34 | 34 | 36 |
| | Droit | 38 | 41 | 39 | 42 | 35 | 34 | 36 | 38 | 37 | 34 | 38 | 40 | 38 |
| Poutre H 4-6 | Gauche | 39 | 39 | 35 | 40 | 41 | 40 | 41 | 40 | 40 | 40 | 38 | 40 | 40 |
| | Mi-tr | 40 | 37 | 32 | 30 | 32 | 31 | 32 | 37 | 36 | 34 | 32 | 36 | 33 |
| | Droit | 38 | 36 | 32 | 38 | 37 | 38 | 37 | 38 | 37 | 39 | 38 | 41 | 38 |
| Poutre H 6-8 | Gauche | 35 | 39 | 40 | 34 | 38 | 33 | 32 | 38 | 36 | 38 | 38 | 37 | 38 |
| | Mi-tr | 30 | 33 | 36 | 36 | 40 | 40 | 31 | 39 | 33 | 34 | 34 | 31 | 34 |
| | Droit | 33 | 33 | 34 | 35 | 35 | 33 | 36 | 30 | 34 | 37 | 30 | 30 | 34 |

Annexe "IV"

| Essais Ultrasonique (in situ) | | | | |
|-------------------------------|-------|---------------|-----------|---------------|
| Poteaux (blocA) | | | | |
| Niveau 3 | | Distance (cm) | Temp (µs) | Vitesse (m/s) |
| Poteau 4-C | Bas | 30,2 | 82,6 | 3656,17 |
| | Mi-Ht | 31 | 84,6 | 3664,30 |
| | Haut | 30,4 | 87,4 | 3478,26 |
| Poteau 6-C | Bas | 29,2 | 74,5 | 3919,46 |
| | Mi-Ht | 29,3 | 73,6 | 3980,98 |
| | Haut | 29,5 | 78,1 | 3777,21 |
| Poteau 6-D | Bas | 24,7 | 76,5 | 3228,76 |
| | Mi-Ht | 29,8 | 72,2 | 4127,42 |
| | Haut | 30 | 77,2 | 3886,01 |
| Poteau 4-D | Bas | 29,8 | 81,7 | 3647,49 |
| | Mi-Ht | 30,3 | 84,8 | 3573,11 |
| | Haut | 30,4 | 99 | 3070,71 |
| Niveau 2 | | Distance (cm) | Temp (µs) | Vitesse (m/s) |
| Poteau 3-A | Bas | 30,4 | 94,2 | 3227,18 |
| | Mi-Ht | 30,6 | 91,1 | 3358,95 |
| | Haut | 29,6 | 88,4 | 3348,42 |
| Poteau 4-A | Bas | 30,3 | 104,2 | 2907,87 |
| | Mi-Ht | 30,7 | 92,1 | 3333,33 |
| | Haut | 30,3 | 91,8 | 3300,65 |
| Poteau 6-A | Bas | 30,2 | 103,2 | 2926,36 |
| | Mi-Ht | 30,6 | 97,5 | 3138,46 |
| | Haut | 30 | 89,7 | 3344,48 |
| Poteau 8-A | Bas | 30,2 | 83,6 | 3612,44 |
| | Mi-Ht | 30,4 | 87 | 3494,25 |
| | Haut | 30,6 | 87,8 | 3485,19 |
| Poteau 9-A | Bas | 30,4 | 77,4 | 3927,65 |
| | Mi-Ht | 31 | 83,6 | 3708,13 |
| | Haut | 30,5 | 86,5 | 3526,01 |
| Poteau 9-B | Bas | 30 | 98,5 | 3045,69 |
| | Mi-Ht | 30 | 98,2 | 3054,99 |
| | Haut | 30 | 85,1 | 3525,26 |
| Poteau 8-B | Bas | 29,9 | 84,6 | 3534,28 |
| | Mi-Ht | 29,9 | 93,8 | 3187,63 |
| | Haut | 30 | 93,6 | 3205,13 |
| Poteau 6-B | Bas | 30,1 | 88,5 | 3401,13 |
| | Mi-Ht | 30 | 94 | 3191,49 |
| | Haut | 29,9 | 91,2 | 3278,51 |

| Poteau 4-B | Bas | 29,7 | 97,8 | 3036,81 |
|------------|-------|---------------|-----------|---------------|
| | Mi-Ht | 29,7 | 107,9 | 2752,55 |
| | Haut | 29,8 | 84 | 3547,62 |
| Poteau 3-B | Bas | 29,5 | 85,2 | 3462,44 |
| | Mi-Ht | 29,6 | 77,6 | 3814,43 |
| | Haut | 29,8 | 91,6 | 3253,28 |
| Poteau 3-C | Bas | 29,5 | 89,4 | 3299,78 |
| | Mi-Ht | 29,9 | 95,6 | 3127,62 |
| | Haut | 29,7 | 87,2 | 3405,96 |
| Poteau 4-C | Bas | 30,4 | 93,6 | 3247,86 |
| | Mi-Ht | 30,2 | 105,2 | 2870,72 |
| | Haut | 30 | 92,5 | 3243,24 |
| Poteau 6-C | Bas | 30,2 | 88 | 3431,82 |
| | Mi-Ht | 30,4 | 96,9 | 3137,25 |
| | Haut | 29,9 | 92 | 3250,00 |
| Poteau 8-C | Bas | 30,3 | 95 | 3189,47 |
| | Mi-Ht | 30,5 | 99 | 3080,81 |
| | Haut | 31 | 89,4 | 3467,56 |
| Poteau 9-C | Bas | 30 | 97,6 | 3073,77 |
| | Mi-Ht | 29,9 | 88,4 | 3382,35 |
| | Haut | 30 | 95,7 | 3134,80 |
| Poteau 9-D | Bas | 30,3 | 83,2 | 3641,83 |
| | Mi-Ht | 30,1 | 95 | 3168,42 |
| | Haut | 29,9 | 92,2 | 3242,95 |
| Poteau 8-D | Bas | 30,4 | 82,2 | 3698,30 |
| | Mi-Ht | 30,5 | 90,4 | 3373,89 |
| | Haut | 30,5 | 94,2 | 3237,79 |
| Poteau 6-D | Bas | 30 | 82 | 3658,54 |
| | Mi-Ht | 30,2 | 84,9 | 3557,13 |
| | Haut | 30 | 85,4 | 3512,88 |
| Poteau 4-D | Bas | 30,1 | 86,1 | 3495,93 |
| | Mi-Ht | 30,2 | 86,7 | 3483,28 |
| | Haut | 30 | 86,7 | 3460,21 |
| Poteau 3-D | Bas | 29,9 | 86 | 3476,74 |
| | Mi-Ht | 30,2 | 88 | 3431,82 |
| | Haut | 30,3 | 80,2 | 3778,05 |
| Niveau 1 | | Distance (cm) | Temp (µs) | Vitesse (m/s) |
| Poteau 3-A | Bas | 28,7 | 72,5 | 3958,62 |
| | Mi-Ht | 28,8 | 71,6 | 4022,35 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 4-A | Bas | 28,7 | 77,6 | 3698,45 |
| | Mi-Ht | 28,9 | 76,1 | 3797,63 |
| | Haut | / | / | / |

| | | | | |
|------------|-------|------|------|---------|
| Poteau 6-A | Bas | 28,4 | 77 | 3688,31 |
| | Mi-Ht | 28,2 | 78,6 | 3587,79 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 8-A | Bas | 28,6 | 85,6 | 3341,12 |
| | Mi-Ht | 28,9 | 81,6 | 3541,67 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 9-A | Bas | 28,5 | 69 | 4130,43 |
| | Mi-Ht | 28,4 | 73,9 | 3843,03 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 9-B | Bas | 28,7 | 75,8 | 3786,28 |
| | Mi-Ht | 28,4 | 76 | 3736,84 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 8-B | Bas | 28,8 | 82,2 | 3503,65 |
| | Mi-Ht | 29 | 87,8 | 3302,96 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 6-B | Bas | 28,7 | 87,1 | 3295,06 |
| | Mi-Ht | 28,4 | 84,7 | 3353,01 |
| | Haut | 28,4 | 91,9 | 3090,32 |
| Poteau 4-B | Bas | 28,7 | 78,8 | 3642,13 |
| | Mi-Ht | 28,5 | 78 | 3653,85 |
| | Haut | 29,2 | 87,8 | 3325,74 |
| Poteau 3-B | Bas | 28,6 | 79,2 | 3611,11 |
| | Mi-Ht | 28,9 | 81,1 | 3563,50 |
| | Haut | 28,7 | 89 | 3224,72 |
| Poteau 3-C | Bas | 28,6 | 74,7 | 3828,65 |
| | Mi-Ht | 28,6 | 77,3 | 3699,87 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 4-C | Bas | 28,4 | 83,2 | 3413,46 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 87 | 3298,85 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 6-C | Bas | 28,4 | 87 | 3264,37 |
| | Mi-Ht | 28,2 | 80,6 | 3498,76 |
| | Haut | 28,2 | 76,3 | 3695,94 |
| Poteau 8-C | Bas | 28,3 | 78,2 | 3618,93 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 83,2 | 3449,52 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 9-C | Bas | 28,3 | 75,4 | 3753,32 |
| | Mi-Ht | 28,1 | 73,6 | 3817,93 |
| | Haut | 28 | 76,2 | 3674,54 |
| Poteau 9-D | Bas | 29,4 | 81,7 | 3598,53 |
| | Mi-Ht | 29,7 | 74,5 | 3986,58 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 8-D | Bas | 29,5 | 81,3 | 3628,54 |
| | Mi-Ht | 29,6 | 79 | 3746,84 |
| | Haut | / | / | / |

| | | | | |
|------------|-------|----------------------|------------------|-----------------------|
| Poteau 6-D | Bas | 29,4 | 73,4 | 4005,45 |
| | Mi-Ht | 29,2 | 75,4 | 3872,68 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 4-D | Bas | / | / | / |
| | Mi-Ht | 30,1 | 76,6 | 3929,50 |
| | Haut | 29,9 | 78 | 3833,33 |
| Poteau 3-D | Bas | 30,3 | 75,9 | 3992,09 |
| | Mi-Ht | 30,4 | 78,8 | 3857,87 |
| | Haut | 30 | 82,4 | 3640,78 |
| RDC | | Distance (cm) | Temp (µs) | Vitesse (Km/s) |
| Poteau 3-A | Bas | 28,8 | 70,2 | 4102,56 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 71,5 | 4013,99 |
| | Haut | 29,1 | 76,8 | 3789,06 |
| Poteau 4-A | Bas | 28,6 | 74,2 | 3854,45 |
| | Mi-Ht | 28,6 | 72,5 | 3944,83 |
| | Haut | 29 | 75,5 | 3841,06 |
| Poteau 6-A | Bas | 28,8 | 96,6 | 2981,37 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 96 | 2989,58 |
| | Haut | 29,3 | 88,2 | 3322,00 |
| Poteau 8-A | Bas | 28,5 | 73,2 | 3893,44 |
| | Mi-Ht | 28,8 | 72,8 | 3956,04 |
| | Haut | 29,3 | 77,8 | 3766,07 |
| Poteau 9-A | Bas | 29 | 71 | 4084,51 |
| | Mi-Ht | 28,5 | 69,9 | 4077,25 |
| | Haut | 28,7 | 82,5 | 3478,79 |
| Poteau 9-B | Bas | 28,6 | 93,3 | 3065,38 |
| | Mi-Ht | 28,8 | 97,2 | 2962,96 |
| | Haut | 29 | 79 | 3670,89 |
| Poteau 8-B | Bas | 29,6 | 92,4 | 3203,46 |
| | Mi-Ht | 29,4 | 77,4 | 3798,45 |
| | Haut | 28,9 | 90,5 | 3193,37 |
| Poteau 6-B | Bas | 29,1 | 84,2 | 3456,06 |
| | Mi-Ht | 29,1 | 86,5 | 3364,16 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 4-B | Bas | 28,8 | 87 | 3310,34 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 88,6 | 3239,28 |
| | Haut | 29 | 102,3 | 2834,80 |
| Poteau 3-B | Bas | 29 | 93,9 | 3088,39 |
| | Mi-Ht | / | / | / |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 3-C | Bas | 28,9 | 97,2 | 2973,25 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 96,1 | 2986,47 |
| | Haut | 29,2 | 88,8 | 3288,29 |

| | | | | |
|------------|-------|------|-------|---------|
| Poteau 4-C | Bas | 29,9 | 93,2 | 3208,15 |
| | Mi-Ht | 29,5 | 95,9 | 3076,12 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 6-C | Bas | 29,2 | 92,6 | 3153,35 |
| | Mi-Ht | 29,4 | 93 | 3161,29 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 8-C | Bas | 28,7 | 96,6 | 2971,01 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 88,8 | 3231,98 |
| | Haut | 28,9 | 78,1 | 3700,38 |
| Poteau 9-C | Bas | 29 | 82 | 3536,59 |
| | Mi-Ht | 28,5 | 94,7 | 3009,50 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 9-D | Bas | 28,8 | 94,6 | 3044,40 |
| | Mi-Ht | 28,8 | 78,2 | 3682,86 |
| | Haut | 29 | 77,3 | 3751,62 |
| Poteau 8-D | Bas | 28,9 | 81,4 | 3550,37 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 93,4 | 3072,81 |
| | Haut | 28,7 | 88,8 | 3231,98 |
| Poteau 6-D | Bas | 29 | 92,9 | 3121,64 |
| | Mi-Ht | 29,1 | 94 | 3095,74 |
| | Haut | 29,2 | 90,7 | 3219,40 |
| Poteau 3-D | Bas | 28,7 | 123,1 | 2331,44 |
| | Mi-Ht | 28,8 | 107,5 | 2679,07 |
| | Haut | / | / | / |

Poteau (bloc B)

| Niveau 1 | | Distance (cm) | Temp (μ s) | Vitesse (km/s) |
|------------|-------|------------------|--------------------|-------------------|
| Poteau 1-E | Bas | 28,6 | 67,9 | 4212,08 |
| | Mi-Ht | 28,6 | 70,1 | 4079,89 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 2-E | Bas | 28,7 | 69,7 | 4117,65 |
| | Mi-Ht | 28,9 | 72,7 | 3975,24 |
| | Haut | 28,5 | 78,5 | 3630,57 |
| Poteau 3-E | Bas | 28,8 | 80,2 | 3591,02 |
| | Mi-Ht | 29 | 77,6 | 3737,11 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 4-E | Bas | 28,8 | 73 | 3945,21 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 71,2 | 4030,90 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 6-E | Bas | 28,7 | 66,8 | 4296,41 |
| | Mi-Ht | 28,4 | 76,3 | 3722,15 |
| | Haut | / | / | / |

| | | | | |
|------------|-------|------|------|---------|
| Poteau 8-E | Bas | 28,6 | 76,8 | 3723,96 |
| | Mi-Ht | 28,5 | 65,8 | 4331,31 |
| | Haut | 28,5 | 65,3 | 4364,47 |
| Poteau 9-E | Bas | 28,5 | 77,3 | 3686,93 |
| | Mi-Ht | 28,6 | 77,9 | 3671,37 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 9-F | Bas | 28,7 | 75,4 | 3806,37 |
| | Mi-Ht | 28,8 | 67,8 | 4247,79 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 8-F | Bas | 28,9 | 73 | 3958,90 |
| | Mi-Ht | 29 | 69 | 4202,90 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 6-F | Bas | 30,8 | 82,7 | 3724,30 |
| | Mi-Ht | 31 | 83,6 | 3708,13 |
| | Haut | 30,5 | 88,2 | 3458,05 |
| Poteau 4-F | Bas | 28,9 | 71,8 | 4025,07 |
| | Mi-Ht | 29,2 | 78,9 | 3700,89 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 3-F | Bas | 28,5 | 73,1 | 3898,77 |
| | Mi-Ht | 28,5 | 76,5 | 3725,49 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 2-F | Bas | 28,7 | 74,7 | 3842,03 |
| | Mi-Ht | 28,5 | 73,6 | 3872,28 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 1-F | Bas | 28,6 | 72,6 | 3939,39 |
| | Mi-Ht | 28,5 | 72,1 | 3952,84 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 1-H | Bas | 28,9 | 71,4 | 4047,62 |
| | Mi-Ht | 29 | 72,7 | 3989,00 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 2-H | Bas | 28,8 | 70,1 | 4108,42 |
| | Mi-Ht | 29,1 | 73,2 | 3975,41 |
| | Haut | 29,6 | 88,2 | 3356,01 |
| Poteau 3-H | Bas | 28,8 | 74 | 3891,89 |
| | Mi-Ht | 29,1 | 75,7 | 3844,12 |
| | Haut | 29,2 | 79,6 | 3668,34 |
| Poteau 4-H | Bas | 28,9 | 72,6 | 3980,72 |
| | Mi-Ht | 29,2 | 74 | 3945,95 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 6-H | Bas | 29,1 | 77 | 3779,22 |
| | Mi-Ht | 29,2 | 76,8 | 3802,08 |
| | Haut | 29,9 | 81,8 | 3655,26 |

| | | | | |
|------------|-------|--------------------------|----------------------|---------------------------|
| Poteau 8-H | Bas | 28,9 | 79,2 | 3648,99 |
| | Mi-Ht | 28,8 | 68 | 4235,29 |
| | Haut | 28,7 | 81,8 | 3508,56 |
| Poteau 8-I | Bas | 28,6 | 70,7 | 4045,26 |
| | Mi-Ht | 28,9 | 71 | 4070,42 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 6-I | Bas | 28,5 | 67,6 | 4215,98 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 69,5 | 4129,50 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 4-I | Bas | 28,4 | 73 | 3890,41 |
| | Mi-Ht | 28,6 | 74,6 | 3833,78 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 3-I | Bas | 28,8 | 70 | 4114,29 |
| | Mi-Ht | 28,9 | 74,4 | 3884,41 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 2-I | Bas | 28,3 | 68,6 | 4125,36 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 70,3 | 4082,50 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 1-I | Bas | 28,5 | 73,5 | 3877,55 |
| | Mi-Ht | 28,6 | 71,9 | 3977,75 |
| | Haut | / | / | / |
| RDC | | Distance (cm) | Temp (µs) | Vitesse (km/s) |
| Poteau 1-E | Bas | 28,6 | 72,2 | 3961,22 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 75,4 | 3806,37 |
| | Haut | 29 | 75,5 | 3841,06 |
| Poteau 2-E | Bas | 28,9 | 71,2 | 4058,99 |
| | Mi-Ht | 29 | 75,2 | 3856,38 |
| | Haut | 29,1 | 76,8 | 3789,06 |
| Poteau 3-E | Bas | 29,8 | 76,1 | 3915,90 |
| | Mi-Ht | 29,9 | 79 | 3784,81 |
| | Haut | 29 | 82 | 3536,59 |
| Poteau 4-E | Bas | 28,9 | 73,2 | 3948,09 |
| | Mi-Ht | 29,1 | 73,6 | 3953,80 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 6-E | Bas | 28,9 | 82,9 | 3486,13 |
| | Mi-Ht | 29 | 80 | 3625,00 |
| | Haut | 29,4 | 77 | 3818,18 |
| Poteau 8-E | Bas | 29,5 | 77,3 | 3816,30 |
| | Mi-Ht | 29,1 | 82,3 | 3535,84 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 9-E | Bas | 30,3 | 74,5 | 4067,11 |
| | Mi-Ht | 29,7 | 80,8 | 3675,74 |
| | Haut | / | / | / |

| | | | | |
|------------|-------|------|------|----------|
| Poteau 9-F | Bas | 29 | 76,3 | 3800,79 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 80,2 | 3578,55 |
| | Haut | 28,8 | 79,8 | 3609,02 |
| Poteau 8-F | Bas | 32,6 | 96,4 | 3381,74 |
| | Mi-Ht | 32,7 | 91,9 | 3558,22 |
| | Haut | / | / | / |
| Poteau 6-F | Bas | 28,7 | 71 | 4042,25 |
| | Mi-Ht | 28,6 | 73,8 | 3875,34 |
| | Haut | 28,8 | 73,8 | 3902,44 |
| Poteau 4-F | Bas | / | / | / |
| | Mi-Ht | 28,6 | 73,7 | 3880,60 |
| | Haut | 28,8 | 76,5 | 3764,71 |
| Poteau 3-F | Bas | 28,6 | 74,4 | 3844,09 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 73,8 | 3888,89 |
| | Haut | 28,7 | 71,7 | 4002,79 |
| Poteau 2-F | Bas | 28,9 | 73 | 3958,90 |
| | Mi-Ht | 28,8 | 77,3 | 3725,74 |
| | Haut | 29 | 78 | 3717,95 |
| Poteau 1-F | Bas | 28,3 | 72,6 | 3898,07 |
| | Mi-Ht | 28,4 | 71,2 | 3988,76 |
| | Haut | 29,2 | 76,5 | 3816,99 |
| Poteau 1-H | Bas | 28,2 | 72,5 | 3889,66 |
| | Mi-Ht | 28,5 | 75 | 3800,00 |
| | Haut | 28,9 | 75,5 | 3827,81 |
| Poteau 3-H | Bas | 28,8 | 73,2 | 3934,43 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 72,7 | 39477,30 |
| | Haut | 29 | 69 | 4202,90 |
| Poteau 4-H | Bas | 29 | 70,6 | 4107,65 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 75,4 | 3806,37 |
| | Haut | 28,8 | 74 | 3891,89 |
| Poteau 6-H | Bas | 28,8 | 79 | 3645,57 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 75,6 | 3796,30 |
| | Haut | 28,8 | 73,6 | 3913,04 |
| Poteau 8-H | Bas | / | / | / |
| | Mi-Ht | / | / | / |
| | Haut | 28,7 | 81,8 | 3508,56 |
| Poteau 6-I | Bas | 28,8 | 76,3 | 3774,57 |
| | Mi-Ht | 28,8 | 80,6 | 3573,20 |
| | Haut | 29 | 77,4 | 3746,77 |
| Poteau 4-I | Bas | 28,8 | 75,2 | 3829,79 |
| | Mi-Ht | 28,9 | 77,3 | 3738,68 |
| | Haut | / | / | / |

| | | | | |
|------------|-------|------|------|---------|
| Poteau 3-I | Bas | 28,8 | 68,5 | 4204,38 |
| | Mi-Ht | 28,8 | 68,5 | 4204,38 |
| | Haut | 28,6 | 69,6 | 4109,20 |
| Poteau 2-I | Bas | 29 | 66,3 | 4374,06 |
| | Mi-Ht | 28,7 | 71 | 4042,25 |
| | Haut | 28,4 | 68,9 | 4121,92 |
| Poteau 1-I | Bas | 28,4 | 69,3 | 4098,12 |
| | Mi-Ht | 28,4 | 72,9 | 3895,75 |
| | Haut | / | / | / |

Poutres (bloc A)

| Niveau 2 | | Distance (cm) | Temps (µs) | Vitesse (Km/s) |
|--------------|--------|---------------|------------|----------------|
| Poutre B 8-9 | Gauche | 30,2 | 86,9 | 3475,26 |
| | Mi-tr | 29,8 | 80,7 | 3692,69 |
| | Droit | 31 | 90,6 | 3421,63 |
| Poutre B 6-8 | Gauche | 30 | 79,8 | 3759,40 |
| | Mi-tr | 30 | 92,9 | 3229,28 |
| | Droit | 30,2 | 90,4 | 3340,71 |
| Poutre B 4-6 | Gauche | 30 | 98,1 | 3058,10 |
| | Mi-tr | 30,1 | 90 | 3344,44 |
| | Droit | 30,5 | 91 | 3351,65 |
| Poutre B 3-4 | Gauche | 30 | 88,1 | 3405,22 |
| | Mi-tr | 30,2 | 93 | 3247,31 |
| | Droit | 30,5 | 96,1 | 3173,78 |
| Poutre C 3-4 | Gauche | 30,1 | 93,2 | 3229,61 |
| | Mi-tr | 30,1 | 89,3 | 3370,66 |
| | Droit | 31 | 86,3 | 3592,12 |
| Poutre C 6-8 | Gauche | 29,7 | 95,3 | 3116,47 |
| | Mi-tr | 30 | 89,6 | 3348,21 |
| | Droit | 30,4 | 92,3 | 3293,61 |
| Poutre C 8-9 | Gauche | 29,5 | 81,6 | 3615,20 |
| | Mi-tr | 30 | 94,6 | 3171,25 |
| | Droit | 30,5 | 91,4 | 3336,98 |
| Poutre D 8-9 | Gauche | 29,7 | 85,1 | 3490,01 |
| | Mi-tr | 29,7 | 75,6 | 3928,57 |
| | Droit | 29,7 | 83,5 | 3556,89 |
| Poutre D 6-8 | Gauche | 29,9 | 85,5 | 3497,08 |
| | Mi-tr | 30 | 92,4 | 3246,75 |
| | Droit | 30,3 | 85,5 | 3543,86 |
| Poutre D 3-4 | Gauche | 30,3 | 96 | 3156,25 |
| | Mi-tr | 30,1 | 94,7 | 3178,46 |
| | Droit | 30,6 | 87,4 | 3501,14 |

| Niveau 1 | | Distance (cm) | Temps (µs) | Vitesse (Km/s) |
|--------------|--------|---------------|------------|----------------|
| Poutre B 8-9 | Gauche | 29,4 | 81,6 | 3602,94 |
| | Mi-tr | 29,2 | 84,8 | 3443,40 |
| | Droit | 29,2 | 83,1 | 3513,84 |
| Poutre B 6-8 | Gauche | 29,2 | 77,8 | 3753,21 |
| | Mi-tr | 29 | 78,8 | 3680,20 |
| | Droit | 29,5 | 83 | 3554,22 |
| Poutre B 4-6 | Gauche | 29,5 | 72,7 | 4057,77 |
| | Mi-tr | 29,1 | 69,5 | 4187,05 |
| | Droit | 29,3 | 67,5 | 4340,74 |
| Poutre B 3-4 | Gauche | 29,4 | 81,4 | 3611,79 |
| | Mi-tr | 29,1 | 74,4 | 3911,29 |
| | Droit | 29,3 | 82,6 | 3547,22 |
| Poutre C 3-4 | Gauche | 29,3 | 78,2 | 3746,80 |
| | Mi-tr | 29,5 | 75,4 | 3912,47 |
| | Droit | 29,3 | 80,2 | 3653,37 |
| Poutre C 6-8 | Gauche | 29,4 | 75,9 | 3873,52 |
| | Mi-tr | 29,4 | 78,8 | 3730,96 |
| | Droit | 29,4 | 77,1 | 3813,23 |
| Poutre C 8-9 | Gauche | 29,2 | 85,7 | 3407,23 |
| | Mi-tr | 29,2 | 81 | 3604,94 |
| | Droit | 29,3 | 73,9 | 3964,82 |
| RDC | | Distance (cm) | Temps (µs) | Vitesse (Km/s) |
| Poutre B 8-9 | Gauche | 29,6 | 75,9 | 3899,87 |
| | Mi-tr | 29,6 | 90 | 3288,89 |
| | Droit | 29,4 | 75,4 | 3899,20 |
| Poutre B 6-8 | Gauche | 29,7 | 78 | 3807,69 |
| | Mi-tr | 29,6 | 71,3 | 4151,47 |
| | Droit | 29,5 | 70,3 | 4196,30 |
| Poutre B 4-6 | Gauche | 29,3 | 87,4 | 3352,40 |
| | Mi-tr | 29,8 | 72,2 | 4127,42 |
| | Droit | 29,8 | 75,2 | 3962,77 |
| Poutre B 3-4 | Gauche | 29,5 | 76,5 | 3856,21 |
| | Mi-tr | 29,3 | 74,1 | 3954,12 |
| | Droit | 29,5 | 74,6 | 3954,42 |
| Poutre C 3-4 | Gauche | 29,6 | 79,5 | 3723,27 |
| | Mi-tr | 29,4 | 79,8 | 3684,21 |
| | Droit | 29,2 | 73,4 | 3978,20 |
| Poutre C 6-8 | Gauche | 29,5 | 66,8 | 4416,17 |
| | Mi-tr | 29,5 | 80,4 | 3669,15 |
| | Droit | 29,5 | 78,7 | 3748,41 |

| | | | | |
|--------------|--------|------|------|---------|
| Poutre C 8-9 | Gauche | 30,4 | 90,4 | 3362,83 |
| | Mi-tr | 29,6 | 75,6 | 3915,34 |
| | Droit | 29,6 | 72,6 | 4077,13 |

Poutres (bloc B)

| Niveau 1 | | Distance (cm) | Temps (μ s) | Vitesse (Km/s) |
|--------------|--------|------------------|---------------------|-------------------|
| Poutre F 1-2 | Gauche | 30,4 | 84 | 3619,05 |
| | Mi-tr | 29,8 | 80 | 3725,00 |
| | Droit | 29,9 | 78,3 | 3818,65 |
| Poutre F 2-3 | Gauche | 30,2 | 82,2 | 3673,97 |
| | Mi-tr | 29,9 | 73,5 | 4068,03 |
| | Droit | 30 | 77 | 3896,10 |
| Poutre F 4-6 | Gauche | 30 | 70,1 | 4279,60 |
| | Mi-tr | 29,9 | 70,6 | 4235,13 |
| | Droit | 29,6 | 78 | 3794,87 |
| Poutre H 1-2 | Gauche | 29,9 | 72,2 | 4141,27 |
| | Mi-tr | 29,6 | 76 | 3894,74 |
| | Droit | 29,8 | 76,8 | 3880,21 |
| Poutre H 2-3 | Gauche | 30 | 77,4 | 3875,97 |
| | Mi-tr | 29,8 | 72,3 | 4121,72 |
| | Droit | 29,8 | 74 | 4027,03 |
| Poutre H 3-4 | Gauche | 29,2 | 75,4 | 3872,68 |
| | Mi-tr | 29,2 | 73 | 4000,00 |
| | Droit | 29,6 | 71,7 | 4128,31 |
| Poutre H 4-6 | Gauche | 30 | 70,8 | 4237,29 |
| | Mi-tr | 29,7 | 75,6 | 3928,57 |
| | Droit | 30,1 | 78,9 | 3814,96 |
| Poutre H 6-8 | Gauche | 29,8 | 71,4 | 4173,67 |
| | Mi-tr | 29,4 | 74,8 | 3930,48 |
| | Droit | 29,7 | 75,7 | 3923,38 |
| Niveau RDC | | Distance (cm) | Temps (μ s) | Vitesse (Km/s) |
| Poutre F 1-2 | Gauche | 29,1 | 77 | 3779,22 |
| | Mi-tr | 29 | 74 | 3918,92 |
| | Droit | 29,1 | 77 | 3779,22 |
| Poutre F 2-3 | Gauche | 29,4 | 84,5 | 3479,29 |
| | Mi-tr | 29,8 | 78 | 3820,51 |
| | Droit | 29,5 | 81,6 | 3615,20 |
| Poutre F 4-6 | Gauche | 29,8 | 80,3 | 3711,08 |
| | Mi-tr | 29,3 | 80 | 3662,50 |
| | Droit | 29,6 | 81,9 | 3614,16 |

| | | | | |
|--------------|--------|------|------|---------|
| Poutre H 1-2 | Gauche | 29,2 | 92,2 | 3167,03 |
| | Mi-tr | 29,8 | 80,4 | 3706,47 |
| | Droit | / | / | / |
| Poutre H 2-3 | Gauche | / | / | / |
| | Mi-tr | 29,8 | 78,5 | 3796,18 |
| | Droit | 29,6 | 74,8 | 3957,22 |
| Poutre H 3-4 | Gauche | 29,4 | 78,3 | 3754,79 |
| | Mi-tr | 29,4 | 73,3 | 4010,91 |
| | Droit | 29,9 | 79,4 | 3765,74 |
| Poutre H 4-6 | Gauche | 29,3 | 74,4 | 3938,17 |
| | Mi-tr | 29,4 | 83,4 | 3525,18 |
| | Droit | 29 | 73,9 | 3924,22 |
| Poutre H 6-8 | Gauche | 29,2 | 74,6 | 3914,21 |
| | Mi-tr | 29,4 | 79,3 | 3707,44 |
| | Droit | 29,4 | 81,6 | 3602,94 |

| Absorption (labo) | | |
|-------------------|-------------|------------|
| POTEAUX | | |
| Element | Zone | C d'absorb |
| Niveau 3 | | |
| Poteau 4-C | Mi-Ht (1/2) | |
| | Mi-Ht (2/2) | 8,09 |
| Poteau 6-C | Mi-Ht (1/2) | |
| | Mi-Ht (2/2) | 6,94 |
| Poteau 6-D | Bas | 9,29 |
| Poteau 4-D | Bas (1/2) | |
| | Bas (2/2) | |
| Niveau 2 | | |
| Poteau 3-A | Bas | |
| | Mi-Ht | 7,66 |
| | Haut | 8,67 |
| Poteau 4-A | Bas | |
| | Mi-Ht | |
| | Haut | 8,54 |
| Poteau 6-A | Bas | |
| | Mi-Ht | |
| Poteau 8-A | Mi-Ht | |
| Poteau 9-A | Bas | |
| Poteau 9-B | Bas | 7,39 |
| Poteau 8-B | Bas (1/2) | |
| | Bas (2/2) | 7,53 |
| Poteau 6-B | Bas | |
| Poteau 4-B | Bas | 7,99 |
| Poteau 3-B | Bas | 7,94 |
| Poteau 3-C | Bas | 6,32 |
| Poteau 4-C | Mi-Ht | 10,73 |
| Poteau 6-C | Haut | |
| Poteau 8-C | Mi-Ht | 8,82 |
| Poteau 9-C | Haut | 8,24 |
| Poteau 9-D | Haut | 9,98 |
| Poteau 8-D | Haut | 8,63 |
| Poteau 6-D | Haut | 7,88 |
| Poteau 4-D | Haut(1/2) | |
| | Haut(2/2) | |
| Poteau 3-D | Haut | 8,01 |

| Niveau 1 | | |
|-----------------|-------------|------|
| Poteau 3-A | Bas | |
| | Haut | 9,10 |
| Poteau 4-A | Mi-Ht | 7,49 |
| Poteau 6-A | Bas | 8,21 |
| Poteau 8-A | Mi-Ht | 8,10 |
| Poteau 9-A | Mi-Ht | 8,96 |
| Poteau 9-B | Haut | 7,79 |
| Poteau 8-B | Bas (1/2) | |
| Poteau 6-B | Haut | 7,42 |
| Poteau 4-B | Bas | |
| Poteau 3-C | Mi-Ht | 7,50 |
| Poteau 4-C | Mi-Ht | |
| Poteau 6-C | Haut | 7,54 |
| Poteau 8-C | Mi-Ht | 8,64 |
| Poteau 9-C | Haut | |
| Poteau 9-D | Bas | 7,80 |
| Poteau 8-D | Bas | 7,25 |
| Poteau 6-D | Mi-Ht | 6,63 |
| Poteau 4-D | Haut | |
| Poteau 3-D | Haut | 7,97 |
| Poteau 2-E | Bas | |
| Poteau 3-E | Mi-Ht | 7,92 |
| Poteau 4-E | Mi-Ht | |
| | Haut | 7,32 |
| Poteau 6-E | Bas | 7,33 |
| Poteau 8-E | Mi-Ht | 7,35 |
| | Haut | |
| Poteau 9-E | Bas | 8,06 |
| | Haut | |
| Poteau 6-F | Bas | 8,31 |
| Poteau 4-F | Mi-Ht | 8,54 |
| Poteau 2-F | Bas | 6,71 |
| Poteau 1-F | Haut | |
| Poteau 1-H | Mi-Ht | 8,04 |
| Poteau 2-H | Mi-Ht (1/2) | |
| | Mi-Ht (2/2) | |
| Poteau 3-H | Bas | 7,55 |
| Poteau 4-H | Haut | 7,80 |
| Poteau 6-H | Mi-Ht | 7,98 |
| Poteau 8-H | Haut | 8,30 |
| Poteau 8-I | Mi-Ht | 8,94 |
| Poteau 6-I | Bas | 7,61 |
| Poteau 4-I | Haut | 8,81 |
| Poteau 3-I | Haut (1/2) | 8,70 |
| | Haut (2/2) | |
| Poteau 2-I | Mi-Ht | 7,62 |
| Poteau 1-I | Bas | 6,51 |

| Niveau RDC | | |
|------------|------------|-------|
| Poteau 3-A | Bas | 7,28 |
| Poteau 4-A | Mi-Ht | 7,32 |
| Poteau 6-A | Bas | / |
| Poteau 8-A | Mi-Ht | 7,27 |
| Poteau 9-A | Mi-Ht | 7,20 |
| Poteau 6-B | Haut | 7,69 |
| Poteau 3-B | Haut | / |
| Poteau 3-C | Mi-Ht | 7,61 |
| Poteau 8-C | Mi-Ht | 7,22 |
| Poteau 9-C | Haut | 7,61 |
| Poteau 9-D | Bas | 5,83 |
| Poteau 8-D | Bas | 19,90 |
| Poteau 6-D | Mi-Ht | 6,76 |
| Poteau 4-D | Haut | 9,07 |
| Poteau 3-D | Haut | 7,75 |
| Poteau 1-E | Haut (1/2) | 13,33 |
| | Haut (2/2) | 0,57 |
| Poteau 2-E | Bas (1/2) | / |
| Poteau 3-E | Mi-Ht | |
| Poteau 4-E | Haut | 8,04 |
| Poteau 6-E | Bas | 8,24 |
| Poteau 8-E | Haut | 7,69 |
| Poteau 9-E | Haut | 7,52 |
| Poteau 9-F | Bas | 7,57 |
| Poteau 8-F | Mi-Ht | 7,28 |
| Poteau 6-F | Bas | 6,65 |
| Poteau 4-F | Mi-Ht | 6,99 |
| Poteau 2-F | Bas | 6,81 |
| Poteau 1-F | Bas | 7,84 |
| Poteau 1-H | Mi-Ht | / |
| Poteau 3-H | Bas | 6,87 |
| Poteau 4-H | Haut | 8,10 |
| Poteau 6-H | Haut | 7,33 |
| Poteau 8-H | Haut | 7,79 |
| Poteau 8-I | Mi-Ht | 7,71 |
| Poteau 6-I | Bas | 8,10 |
| | Mi-Ht | 6,44 |
| Poteau 4-I | Mi-Ht | 7,39 |
| Poteau 3-I | Bas | 7,97 |
| Poteau 2-I | Mi-Ht | 6,37 |
| Poteau 1-I | Bas | 5,56 |

POUTRES

| Element | zone | C d'abso |
|-----------------|--------------|----------|
| Niveau 2 | | |
| Poutre B 8-9 | Gauche | / |
| Poutre B 6-8 | Mi-tr | 9,85 |
| Poutre B 4-6 | Gauche | |
| | Droit | 8,34 |
| Poutre B 3-4 | Gauche (1/2) | 10,09 |
| | Gauche (2/2) | 11,44 |
| | Mi-tr | 8,72 |
| | Droit | / |
| Poutre C 3-4 | Droit | / |
| Poutre C 6-8 | Droit | 10,26 |
| Poutre C 8-9 | Mi-tr | 9,47 |
| Poutre D 8-9 | Gauche | 10,11 |
| | Mi-tr | 9,12 |
| Poutre D 6-8 | Droit | 8,66 |
| Poutre D 3-4 | Mi-tr | 10,69 |
| Niveau 1 | | |
| Poutre B 8-9 | Mi-tr | 8,79 |
| | Droit | / |
| Poutre B 6-8 | Gauche | 6,97 |
| | Gauche | |
| | Mi-tr (1/2) | 9,74 |
| Poutre B 4-6 | Mi-tr (2/2) | |
| | Gauche | 7,53 |
| Poutre B 3-4 | Mi-tr | 6,90 |
| | Gauche (1/2) | 9,35 |
| Poutre B 3-4 | Gauche (2/2) | / |
| | Mi-tr (1/3) | 8,70 |
| | Mi-tr (2/3) | |
| | Mi-tr (3/3) | / |
| Poutre C 3-4 | Gauche | 8,08 |
| Poutre C 4-5 | Mi-tr | / |
| Poutre C 6-8 | Mi-tr(1/2) | / |
| | Droit (1/2) | 8,10 |
| | Droit (2/2) | / |
| Poutre C 8-9 | Gauche (2/3) | 6,08 |
| | Mi-tr (2/2) | 7,86 |
| Poutre D 4-5 | Mi-tr | 7,84 |
| Poutre E 1-2 | Mi-tr | 9,27 |

| | | |
|------------------------------|--------------|------|
| Poutre C 8-9 | Gauche (2/3) | 6,08 |
| | Mi-tr (2/2) | 7,86 |
| Poutre D 4-5 | Mi-tr | 7,84 |
| Poutre F 1-2 | Mi-tr | 9,37 |
| Poutre F 2-3 | Gauche | 9,11 |
| | Mi-tr | 6,59 |
| | Droit | 6,67 |
| Poutre F 4-6 | Mi-tr | 7,80 |
| Poutre H 1-2 | Droit | 6,78 |
| Poutre H 2-3 | Mi-tr | 6,18 |
| Poutre H 3-4 | Gauche | 7,54 |
| Poutre H 4-6 | Mi-tr | 9,79 |
| Poutre H 6-8 | Gauche | 7,36 |
| Niveau RDC | | |
| Poutre B 8-9 | Gauche | / |
| | Mi-tr | |
| Poutre B 6-8 | Droit | 6,35 |
| Poutre B 4-6 | Mi-tr | / |
| | Droit | / |
| Poutre B 3-4 | Gauche | 7,59 |
| Poutre C 3-4 | Mi-tr | 7,95 |
| | Droit | 7,27 |
| | Mi-tr | 8,15 |
| Poutre C 4-5 | Mi-tr | 6,64 |
| | Droit | 7,30 |
| Poutre C 6-8 | Mi-tr | 6,05 |
| | Droit | 7,22 |
| Poutre D 4-5 Poutre F 1-2 | Mi-tr | 6,68 |
| | Gauche | 7,21 |
| | Mi-tr | 8,08 |
| Poutre F 2-3 | Droit | 7,61 |
| | Gauche | / |
| | Mi-tr | 8,52 |
| Poutre F 3-4 Poutre F 4-6 | Droit | / |
| | Mi-tr | 7,41 |
| Poutre H 1-2 | Gauche | 8,37 |
| | Droit | 8,96 |
| Poutre H 2-3 | Mi-tr(1/2) | 7,93 |
| | Mi-tr(2/2) | 9,76 |
| Poutre H 2-3 | Mi-tr | 7,17 |
| | Droit | |

| | | |
|------------------------|--------------|------|
| Poutre H 3-4 | Gauche (1/2) | 7,46 |
| | Gauche (2/2) | 7,00 |
| | Mi-tr | 6,16 |
| Poutre H 4-6 | Gauche | 7,57 |
| | Mi-tr | |
| | Droit | 7,14 |
| Poutre H 6-8 | Gauche | 7,90 |
| | Mi-tr | 7,99 |
| Poutre E, 3-4 Escalier | Mi-tr | 7,20 |

