

ETUDE DES PARAMETRES INFLUANT SUR LES PERTES DE BETON PROJETE PAR VOIE SECHE

INFLUENT PARAMETERS ON DRY-MIX SHOTCRETE REBOUND

Julie Armengaud^{1,3}, Géraldine Casaux-Ginestet^{1,2}, Sylvain Alliens², Anne Doche², Sophie Durantel², Pierre Valentin², Martin Cyr¹, Bernard Husson¹, Philippe Robit³

¹ LMDC, Université de Toulouse, INSAT, UPS, Toulouse, France

² INSA Toulouse, département Génie Civil, Toulouse, France

³ Entreprise GTS, groupe NGE, Saint-Priest, France

RÉSUMÉ –La projection de béton par voie sèche conduit à des proportions importantes de pertes par rebond (~30%). Cet article se propose d'étudier différents paramètres ayant un effet sur ces pertes: teneur en eau et granulométrie du mélange ainsi que l'utilisation d'additions ; l'influence sur la porosité des bétons réalisés est également examinée. Des mesures statiques et dynamiques sur le béton projeté frais permettent de corréler les caractéristiques à l'état frais et le phénomène de rebond indépendamment de la composition du mélange projeté.

ABSTRACT–Dry-mix shotcrete generates high material losses due to rebound(~30%). The goal of the study was to analyse the role of aggregate size distribution, water and supplementary cementitious materials on these losses and on resulting porosity. Static and dynamic measures on fresh shotcrete were done to find a correlation with rebound independent of mix design.

1. Introduction

Le béton projeté par voie sèche est une technique fréquemment utilisée en réalisation de travaux de génie civil de type stabilisation de parois, en réparation d'ouvrages, ou encore en bâtiment de par la liberté des formes géométriques possibles.

La principale problématique de cette technique est de conduire à des pertes en matériaux très élevées (30% en moyenne), liées au rebond du béton projeté sur la surface de réalisation.

En effet, au coût économique de ces pertes, s'ajoutent la modification de la composition du béton en place par rapport à la formulation choisie, ainsi que l'impact environnemental lié à la surconsommation de matériaux (nécessité d'une mise en décharge des pertes, surémission de CO₂ lié à la fabrication du ciment, pollution potentielle des eaux).

Face à ce constat, la perspective d'améliorer les caractéristiques du béton projeté afin de diminuer la surconsommation de matériaux due au rebond s'avère un enjeu important.

Ainsi, après une rapide revue bibliographique dégagant les principaux éléments influant sur le rebond du béton projeté par voie sèche, les résultats expérimentaux obtenus au laboratoire LMDC de Toulouse sont présentés. Plusieurs paramètres de formulation sont évalués dans l'objectif de dégager leur influence sur le rebond. Ces paramètres étant dépendant les uns des autres, il est proposé d'étudier le rebond en fonction des propriétés du béton frais et non de la formulation initiale. Des mesures statiques et dynamiques sont donc réalisées afin de caractériser le béton frais et de les relier au rebond.

2. Paramètres influant sur le rebond du béton projeté par voie sèche

La proportion importante des pertes en béton projeté par voie sèche (environ 30%) a incité chercheurs et industriels à s'intéresser à ce procédé. De nombreux travaux ont mis en évidence les paramètres ayant une influence sur la quantité de pertes par rebond (Jolin, 1999 ; Bolduc, 2009 ; Géromey, 2003 ; Armelin et Banthia, 1998 ; Royer, 2013 ; Armelin, 1997). Ces paramètres sont nombreux et pourraient être divisés en deux catégories liées : soit au procédé de projection en lui-même, soit à la composition du mélange.

2.1 Paramètres techniques

Le processus de projection comprend aussi bien les réglages machines que l'expérience du porte-lance. Un opérateur mal formé est la première source de rebond. Il faut en effet veiller à respecter une distance lance/paroi acceptable ou encore, positionner la lance de manière à avoir un angle d'incidence perpendiculaire au support (Géromey, 2003). Au niveau des réglages, des études ont montré qu'il existe un débit d'air optimal permettant au flux impactant de s'incruster dans le substrat sans engendrer une surproduction de pertes (Bolduc, 2009 ; Armelin, 1997).

Les notions de vitesse, d'énergie et de contraintes sont mises en évidence, notamment dans les thèses de (Jolin, 1999 ; Ginouse, 2014) et seront analysées par la suite. A noter également que l'usure du matériel est à prendre en compte.

Il est évoqué dans les recommandations existantes (ASQUAPRO, 2013) que les contraintes intrinsèques de chaque chantier : rigidité du support, épaisseur de la couche à réaliser, mais également la densité du ferrailage peuvent avoir une influence non négligeable sur la quantité de pertes.

2.2 Paramètres de formulation

Le paramètre de composition du mélange ayant une influence prépondérante sur les pertes occasionnées lors de la projection de béton est l'eau (Armelin et Banthia, 1998 ; Pfeuffer et Kusterle, 2001). L'eau est ajoutée à la lance pendant la mise en place et représente le paramètre le plus simple à ajuster. Cela implique, que la qualité du béton est directement dépendante du porte-lance. Il est possible de pré-mouiller ou de pré-humidifier un mélange afin de limiter le rebond (Bolduc, 2009).

Plusieurs travaux (Armelin et Banthia, 1998 ; Bolduc, 2009 ; Jolin et Beaupre, 2004) ont évoqué le fait que la granulométrie avait un rôle primordial sur les pertes par rebond. La taille des granulats est donc à prendre en compte (les gros granulats représenteraient un rebond 4 fois supérieur à celui des granulats fins).

La teneur et le type de liant jouent aussi un rôle dans la limitation des pertes en modifiant la consistance du mélange. (Armelin, 1997 ; Morgan, 1988 ; Bindiganavile et Banthia 2000 ; Kaci, 2011).

D'après (Géromey, 2003), les pertes participeraient à la compacité du béton et donc à la qualité du matériau. Ainsi, les pertes seraient indissociables de la mise en œuvre par projection et de la notion de bonne qualité du béton projeté. Ces deux exigences primordiales, pertes minimales, mais qualité maximale, font alors l'objet d'un compromis. Cependant, (Figueiredo, 1999) remarque que la compaction est meilleure lorsque le volume de pâte incorporée est plus grand. Or un plus grand volume de pâte limite le rebond (Armelin, 1997).

L'étude réalisée a pour but de mettre en évidence les paramètres de formulation des mélanges ayant une influence sur les pertes. Une première analyse de leurs interactions est proposée.

3. Procédure expérimentale : Formulation et paramètres mesurés

3.1. Formulation

Deux types de mélanges avec des granulométries différentes ont été étudiés : les mélanges notés A avec un rapport G/S de 0,52 et les mélanges notés B avec un rapport G/S de 0,22. Afin de vérifier l'action du type de liant sur le rebond, de la fumée de silice (SF), du métakaolin (MK) et du laitier de hauts fourneaux (LL) ont été employés en remplacement partiel de CEM I. Le tableau 1 récapitule les différentes formulations (les noms des mélanges indiquent le type d'addition et le pourcentage massique de remplacement du ciment). Pour évaluer l'impact de l'eau sur le rebond des différents mélanges, plusieurs consistances ont été réalisées. Les granulats et le sable utilisés sont d'origine alluvionnaire siliceux, roulés et lavés.

Tableau 1 . Composition des mélanges

Nom → Proportion (%massique béton sec) \ Constituants ↓	REF A	REF B	REF A + 20% MK	REF A + 10% SF	REF B + 20% MK	REF B + 10% SF	REF B + 50%LL
Granulats 4/10	28%	15%	28%	28%	15%	15%	15%
Sable 0/4	54%	68%	54%	54%	68%	68%	68%
CEM I 52,5R	17%	17%	14%	16%	14%	16%	8,5%
Addition							
<i>Métakaolin</i>	-	-	4%	-	3%	-	-
<i>Fumée de silice</i>	-	-	-	2%	-	1%	-
<i>Laitier de haut fourneau</i>	-	-	-	-	-	-	8,5%
Nombre de projections	10	5	4	5	5	5	5

3.2. Paramètres mesurés

3.2.1. Rebond

Le rebond a été évalué à l'aide d'un dispositif original mis en place au LMDC. Le calcul des pertes a été calculé suivant la formule (1).

$$\text{Rebond [\%]} = \frac{\text{Masse pertes [kg]}}{\text{Masse pertes [kg]} + \text{Masse sur le support [kg]}} \quad (1)$$

3.2.2. Teneur en eau du béton frais

Le béton projeté n'étant pas malaxé avec l'eau de gâchage avant projection, la quantité d'eau ajoutée ne peut pas être connue en avance. La mesure de la teneur en eau du béton frais a donc été réalisée sur un échantillon de béton frais prélevé sur le support après chaque projection, afin d'en avoir une évaluation.

3.2.3. Consistance / contrainte de contact statique (P)

La consistance de chaque mélange a été déterminée à l'aide d'un pénétromètre usuellement utilisé pour la mesure des temps de prise. Quinze mesures ont été réalisées par panneau projeté. Ici, c'est un outil de comparaison de la résistance à la pénétration d'une aiguille dans le substrat. La contrainte nécessaire à l'enfoncement [MPa] est relevée. Cette donnée peut être assimilée à un seuil de cisaillement (Johnson, 1985).

3.2.4. Contrainte de contact dynamique (P_{dyn})

La contrainte de contact dynamique est une mesure d'indentation dynamique qui consiste à mesurer l'empreinte laissée par une bille sur le substrat après projection à une énergie donnée. Cette mesure pourrait se rapprocher d'une mesure de viscosité (Armelin, 1997). Pour cette mesure, des billes en verre et un lanceur pneumatique ont été employés afin d'atteindre des vitesses de l'ordre de 20m/s, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur des vitesses de projection. Le lanceur est placé à une distance fixe de 20cm du support et les

frottements de l'air sont négligés. 6 mesures ont été réalisées par panneau. La contrainte de contact dynamique a été calculée comme :

$$P_{\text{dynamique}} [Pa] = \frac{\text{Energie de la bille [J]}}{\text{Volume de l'empreinte [m}^3\text{]}} \quad (2)$$

3.2.5. Résistance en compression

Les résistances en compression ont été mesurées à 28 j sur cube. La résistance moyenne obtenue pour chaque mélange est supérieure à 45MPa ce qui correspond aux résistances attendues en général dans les CCTP pour des applications en paroi clouée.

4. Etude de l'influence de la formulation sur le rebond

4.1. Influence de la granulométrie et des additions sur le rebond

Les projections réalisées ont permis de tester deux proportions différentes de sable et de gravillon, et ce pour divers mélanges contenant des additions spécifiques. Les pertes par rebond, exprimées en pourcentage, sont tracées sur la figure 1.

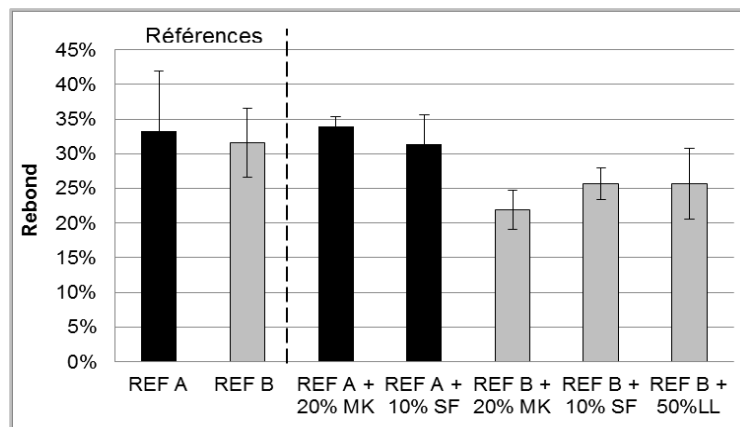


Figure 1. Pertes par rebond pour les différents mélanges

Ces résultats mettent en évidence plusieurs phénomènes.

Le mélange Adonne des pertes par rebond plus homogènes que le mélange B. En effet, les pertes pour les mélanges A avec et sans additions sont comprises entre 30% et 34% tandis que les mélanges B donnent un intervalle de pertes plus large, qui s'étend de 22% à 32%.

Le mélange A, qui contient plus de granulats 4/10, s'accompagne de pertes par rebond plus grandes que pour le mélange B. La moyenne des pertes par rebond pour les deux mélanges, de granulométries différentes, indique que l'ajout d'une plus grande proportion de sable permet de réduire les pertes par rebond. Cela est d'autant plus visible en regardant deux bétons réalisés avec une même addition et des granulométries différentes. Par exemple, avec le métakaolin, les pertes pour le mélange A atteignent 34% tandis que les pertes associées au mélange B sont de 22% : augmenter la proportion de sable a permis de réduire les pertes de plus du tiers. De ce fait, le rebond d'un béton contenant une proportion de sable importante paraît davantage sensible à l'utilisation d'additions pour réduire le rebond. Pour optimiser l'utilisation des additions, il faut donc prendre en compte le squelette granulaire.

La Figure 2, qui concerne plusieurs mélanges aux additions et granulométries différentes, met en évidence un lien entre la porosité et le rebond. On remarque que les mélanges B présentent une plus grande porosité que les mélanges A. La granulométrie des mélanges B est moins optimale pour avoir la meilleure compacité théorique, ce qui génère une

augmentation de la porosité du mélange projeté. Pour un mélange de granulométrie donnée, la porosité est plus faible lorsque le rebond augmente. La compaction induite par le rebond entraîne certainement un meilleur arrangement des grains. Un mélange avec un plus grand rapport G/Sest mieux optimisé au niveau de la porosité (Mélanges A), mais induit plus de rebond. D'autre part, le rebond intervient dans la compaction, donc pour un mélange donné, l'augmentation du rebond entraîne une moindre porosité. L'optimisation d'un mélange est fonction du paramètre à améliorer : la réduction du rebond peut avoir, par exemple, pour conséquence d'augmenter la porosité du béton, ce qui risque d'en diminuer la durabilité

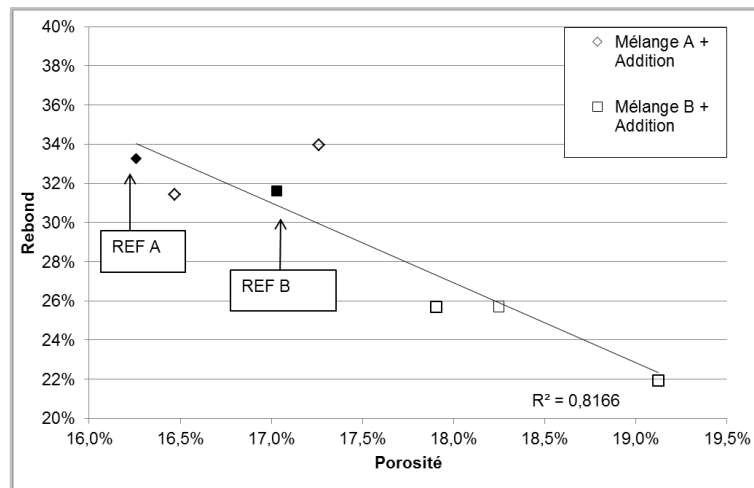


Figure 2. Rebond en fonction de la porosité et des mélanges. Les mélanges de référence sans addition sont signalé par les marqueurs plein. Les marqueurs vides correspondent aux mélanges avec addition

4.2. Influence de la teneur en eau

Un autre facteur clé pour la compréhension du rebond, et qui a été cité précédemment est la teneur en eau du mélange. En effet, une teneur en eau optimale conditionne la qualité du béton. Or c'est un paramètre difficile à maîtriser, car ce dernier est principalement géré par la compétence et l'expérience de l'ouvrier. Il faut savoir apprécier la teneur en eau optimale en fonction du comportement du mélange de béton lors de la projection. L'ajustement du débit d'eau se fait en fonction de la consistance du matériau projeté et non du rapport eau/liant visé.

La consistance du matelas de béton déjà en place influe sur la facilité d'incrustation des particules dans la couche de béton et donc sur les rebonds. Pour une même formulation, un mélange trop ferme signifie un manque d'eau tandis qu'un mélange trop plastique traduit un excès d'eau.

La Figure 3 montre que pour les 2 types de mélanges, l'ajout d'eau permet de réduire le rebond. Les teneurs en eau mesurées se situent entre 8,3% et 14,8%. (Géromey, 2003) relevait des teneurs en eau entre 7,8 % à 9,8 %. Cependant, les mélanges étant différents il est donc difficile de conclure quant à la quantité d'eau « normale » à insérer. L'ordre de grandeur de la teneur en eau reste néanmoins identique, ce qui confirme la cohérence des résultats obtenus. Le coefficient de corrélation obtenu sur la Figure 3a reste cependant plutôt faible. Cela peut s'expliquer par l'utilisation de différentes formulations, qui ne réagissent donc pas de la même manière avec l'eau. Il est intéressant de constater qu'en fonction de chaque mélange, l'influence de la teneur en eau est plus ou moins importante sur le rebond.

En effet, en ce qui concerne la courbe et les points pour les mélanges A + addition (Figure 3b), le mélange de référence est beaucoup plus sensible à la teneur en eau que le

mélange contenant la fumée de silice ou le métakaolin. Pour le mélange A avec métakaolin, la tendance va à l'inverse des autres mélanges ce qui peut être causé par une erreur de manipulation. On remarque cependant que l'utilisation de métakaolin dans le mélange B (Figure 3c) entraîne une moindre sensibilité du rebond à la teneur en eau. Ce résultat montre que le métakaolin peut être une addition pertinente dans le sens où son utilisation permet une variation de la teneur en eau plus large, tout en restant dans des valeurs de rebond acceptables, la dépendance au réglage en eau, et donc à l'opérateur, serait moindre avec cette addition.

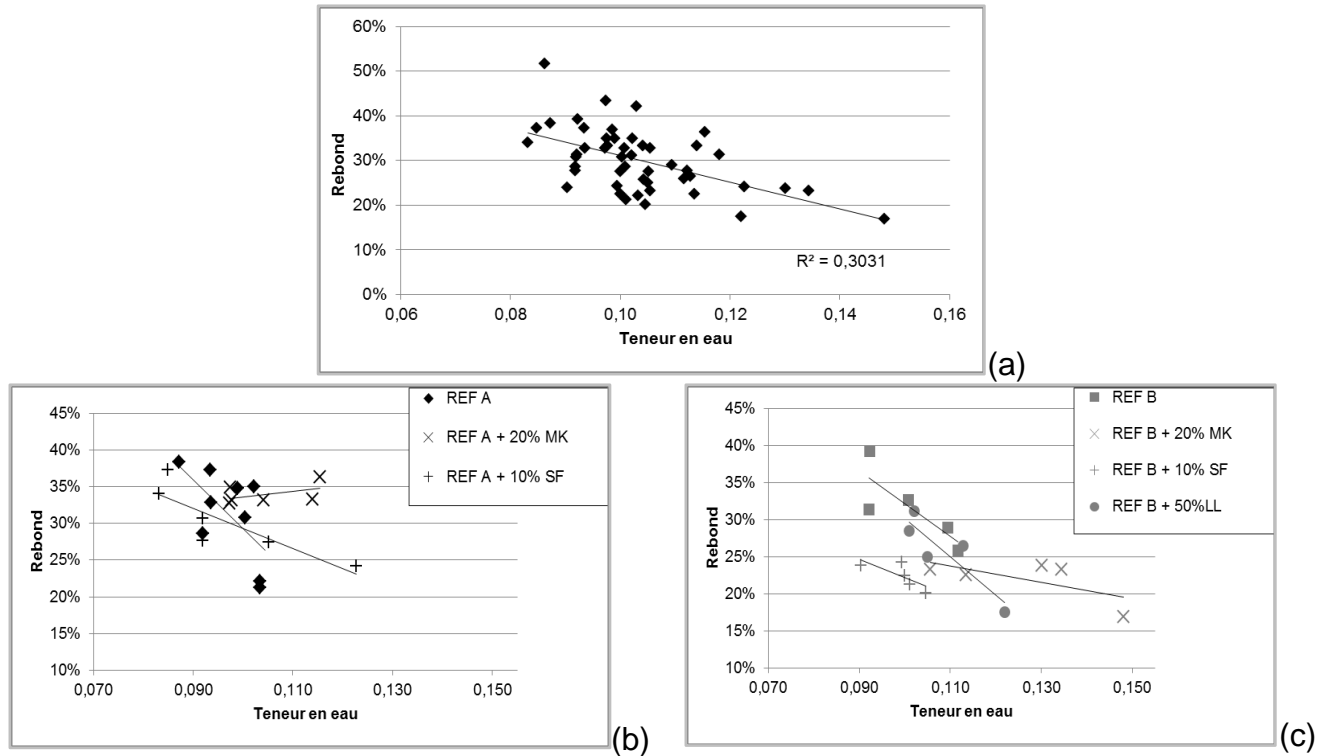


Figure 3. Rebond en fonction de la teneur en eau pour les mélanges A et B confondus (a), pour les mélanges A (b), et les mélanges B (c)

Ceci montre l'intérêt de mettre en place des additions dans les mélanges afin de limiter l'impact de la teneur en eau sur le rebond. En fonction de chaque mélange et de chaque addition, (qui agissent de manière spécifique sur le mélange), l'ajout d'eau peut alors influencer de manière plus ou moins importante sur le rebond.

5. Recherche du lien entre rebond et propriétés rhéologiques du béton frais

Dans le paragraphe 4, il a été montré que la formulation du mélange avait une influence sur le rebond. Mais il est difficile de déterminer quelles sont les propriétés exactes attendues pour avoir une réelle diminution du rebond. En effet, les paramètres sont dépendants les uns des autres. Afin de quantifier le rebond en s'affranchissant des caractéristiques de formulation du mélange, deux mesures ont été effectuées sur le béton frais : une mesure avec un pénétromètre statique et une mesure dynamique. Ce choix de mesure s'appuie sur le fait que le matériau étudié est relativement ferme et ne s'écoule pas, ce qui limite l'utilisation d'outils rhéologiques classiques.

5.1. Rebond et contrainte statique

La mesure au pénétromètre permet de diagnostiquer quantitativement, en termes de contraintes, la dureté de la couche de béton frais. Cette mesure est répertoriée sur la Figure 4a et tracée en fonction du rebond. Il semble que cette mesure soit moins dépendante des formulations testées que la mesure de teneur en eau, comme en atteste

le coefficient de corrélation deux fois plus élevé que celui obtenu Figure3. Cependant, cette mesure ne prend pas en compte la composante dynamique de l'impact.

5.2. Rebond et contrainte dynamique

Une mesure dynamique (P_{dyn}) a été réalisée afin de déterminer s'il existait un lien avec le rebond. La Figure 4b montre qu'une relation logarithmique existe bien entre ces deux valeurs ce qui semble logique puisque c'est une mesure d'impact. De plus, cela recoupe les résultats de (Jolin, 1999).

5.3. Rebond en fonction des propriétés statiques et dynamiques

La mesure de la contrainte statique se rapproche d'une mesure de seuil et la mesure dynamique, d'une viscosité. Dans un modèle rhéologique de type Binghamien par exemple, la description du matériau se fait en combinant un seuil et une viscosité. Il semble donc naturel que le rebond dépende de P et P_{dyn} à la fois. En sommant simplement P et P_{dyn} on trouve effectivement une plus forte corrélation avec le rebond (Figure 4c). Des essais complémentaires seront réalisés afin d'approcher une loi de comportement du rebond en fonction de P et P_{dyn} .

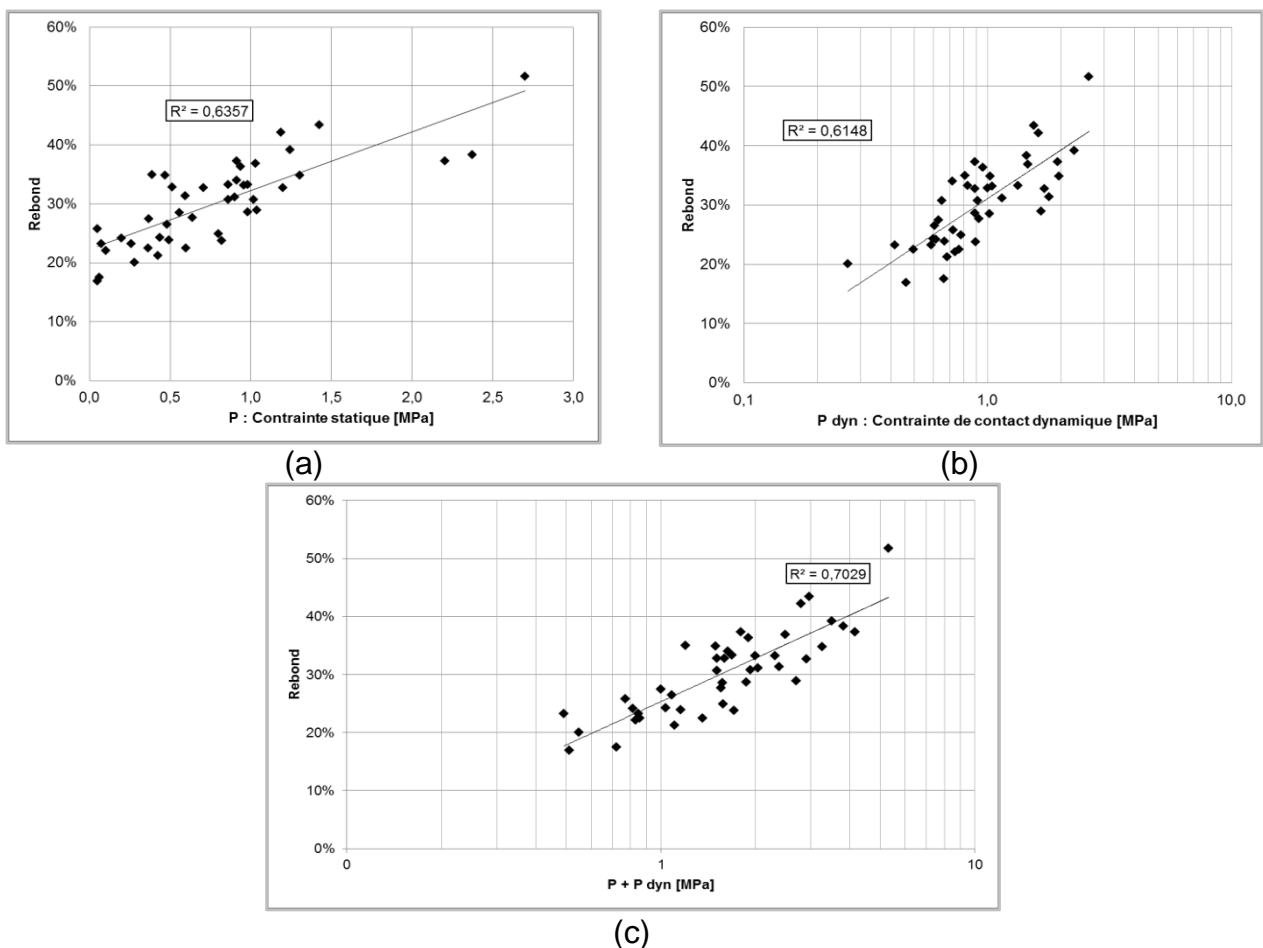


Figure 4. Rebond en fonction de la pénétration statique (a). Rebond en fonction de la contrainte dynamique (b). Rebond en fonction de la contrainte statique et dynamique (c)

Au vu des résultats obtenus avec les mesures statiques et dynamiques, il semble que ces paramètres soient indépendants du mélange. Il serait donc intéressant de déterminer quelles sont les caractéristiques du mélange initial nécessaires pour diminuer P et P_{dyn} afin de limiter le rebond. En recherchant directement les leviers d'action sur P et P_{dyn} , il sera plus aisé de proposer des formulations à faible rebond. La capacité d'une addition à

interagir avec l'eau et la capacité de la pâte à dissiper l'énergie (et donc réduire Pd) peuvent en particulier constituer des moyens intéressants.

6. Conclusion

De nombreux paramètres sont identifiés comme influençant le rebond du béton projeté par voie sèche. Trois paramètres de formulation ont été plus particulièrement examinés dans cette étude : la granulométrie, les additions et la teneur en eau : ils jouent un rôle primordial dans l'optimisation des mélanges afin de réduire les pertes par rebond. Cependant, si l'action sur le rebond de chaque paramètre pris indépendamment est connue de manière empirique, l'influence combinée de ces paramètres semble plus complexe : c'est en particulier le cas de l'influence d'une addition qui est différente selon le squelette granulaire dans lequel elle est incluse. Des mesures statiques et dynamiques ont été réalisées sur le béton frais afin de caractériser le mélange en fonction du rebond. Cette corrélation entre les mesures statiques et dynamiques et les pertes par rebond a pu se faire indépendamment de la formulation initiale. Les essais complémentaires en cours devraient permettre à terme de comprendre les mécanismes d'interaction et donc d'optimiser la formulation de béton projeté par voie sèche.

7. Références bibliographiques

- ASQUAPRO (2013). Fascicules du Comité Techniques ASQUAPRO [en ligne].
- Armelin, H.S., Banthia, N. (1998). Mechanics of aggregate rebound in shotcrete—(Part I). *Materials and Structures*. 1 mars 1998. Vol. 31, n° 2, p. 91-98.
- Armelin, H.S. (1997). Rebound and toughening mechanisms in steel fiber reinforced dry-mix shotcrete. *Thèse, University of British Columbia, Canada*.
- Bindiganavileet Banthia (2000). Rebound in Dry-Mix Shotcrete : Influence of Type of Mineral Admixture. *ACI Materials Journal*, 97(2), pp. 1-6.
- Bolduc, Louis-Samuel, 2009. Étude des propriétés de transport du béton projeté. *Thèse Université Laval, Canada*
- Gérôme, S. (2003). Evaluation des paramètres d'obtention de la qualité des bétons projetés dans des soutènements provisoires, des revêtements définitifs et des renforcements d'ouvrages. *Thèse INSA Lyon, URGC - Unité de Recherche en Génie Civil, France*.
- Ginouse, N. (2014). Étude Fondamentale du Processus de Mise en Place en Béton Projeté. *Thèse Université Laval, Canada*.
- Johnson, K.L., 1985. Contact mechanics, Cambridge University Press.
- Jolin, M. (1999). Mechanisms of placement and stability of dry process shotcrete. *Thèse University of British Columbia, Canada*.
- Jolin, M., Beaupré D. (2004). Effects of particles size distribution in dry process shotcrete. *ACI Materials Journal*. Mars 2004. p. 131-135
- Kaci, A. et Chaouche, M. (2011). Influence d'une argile bentonitique sur le comportement rhéologique des mortiers projetés. *XXIX - Rencontres universitaires de Génie Civil, Tlemsen, 29 au 31 Mai 2011*. 2011. p. 459-469.
- Morgan, D. (1988). Dry mix silica fume shotcrete in western Canada. *Concrete International*. Janvier 1988. Vol. 10, n° 1, p. 24-32.
- Pfeuffer, M. et Kusterle, W. (2001). Rheology and rebound behaviour of dry-mix shotcrete. *Cement and Concrete Research*. Juillet 2001. Vol. 31, p. 1619-1625
- Royer, J.M. (2013). Étude de la mise en place et compaction du béton projeté. *Thèse Université Laval, Canada*