Optimisation des propriétés des bétons projetés par voie sèche

Julie ARMENGAUD

LMDC, Université de Toulouse, INSAT, UPS, France – julie_armengaud@hotmail.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. Le béton projeté est une méthode de mise en place consistant en la projection pneumatique de béton sur une surface à grande vitesse. Dans le cas de la méthode par voie sèche, le mélange granulats-ciment est introduit sec en machine, l'eau étant ajoutée à la fin du transfert. Cette technique, très employée, est néanmoins génératrice de pertes importantes par rebond, pouvant s'élever jusqu'à 40% de la masse projetée. L'enjeu de la réduction des pertes est à la fois économique et environnemental. Les facteurs influents sur le rebond sont liés aux techniques de projection et à la formulation. Le squelette granulaire et des additions de substitution telles que le métakaolin, la fumée de silice et le laitier de haut fourneau ont été étudiés dans le but de réduire les pertes. Une modélisation du phénomène de rebond est également abordée. Les formulations proposées doivent aussi permettre au béton d'assurer un rôle structurel durable, ce qui a été vérifié par des mesures de résistance et de propriétés de transfert.

ABSTRACT. Shotcrete is a concrete pneumatically projected onto a surface at high velocity. Dry-mix shotcrete is a process in which dry constituents are introduced into the machine and conveyed through a hose to the nozzle, where the water is added. This process is used in various civil engineering or construction projects; unfortunately, it can lead to high losses of concrete due to rebound (up to 40% of the total mass of material). Such losses induce overconsumption of material, which is damaging for the cost of the work and for the environment. Rebound depends on technical parameters and mix design. The present work focuses on rebound reduction by modification of the mix design and particularly aggregate size distribution and supplementary cimentitious material (metakaolin, silica fume and ground granulated blast furnace slag). An analytical approach of rebound phenomenon is also implemented. Transport properties and compressive strength have been evaluated to ensure that mixture design meets with durable structural requirements.

MOTS-CLÉS : Béton projeté, Voie sèche, Rebond, Durabilité, Additions, Granulométrie, Porosité

KEYWORDS: Dry-mix shotcrete, Rebound, Durability, Supplementary Cementitious Materials, Aggregate size distribution, Porosity.

1. Introduction

Le béton projeté est une méthode de mise en place du béton permettant de s'affranchir d'une partie des coffrages et de s'adapter à des géométries diverses. Cette technique est fréquemment utilisée pour diverses applications du génie civil : parois clouées, réalisations de voûtes de tunnels ou réparations d'ouvrages. La norme NF EN-14487 le défini comme « un mélange de base projeté par voie pneumatique à l'aide d'une lance pour former une masse dense et homogène rendue compacte par sa propre énergie cinétique ». Il existe deux grandes techniques de projection. La projection par voie mouillée, dans laquelle le béton est malaxé et introduit en machine pour être projeté et la projection par voie sèche, dans laquelle le mélange est introduit sec en machine, l'eau n'étant ajoutée qu'à la fin du transfert, il n'y a donc pas de malaxage préalable avec l'eau de gâchage.

Cette dernière technique présente des avantages en termes de maniabilité et de rapidité d'installation. Cependant, la projection par voie sèche conduit aussi à des pertes en matériaux très élevées, pouvant atteindre entre 30% et 40% de la masse projetée, liées au rebond du béton sur la surface à réaliser. 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. Face à ce constat, la perspective d'améliorer les caractéristiques du béton projeté afin de diminuer la surconsommation de matériaux liée au rebond s'avère un enjeu important.

Deux types de paramètres sont influents sur le phénomène de rebond : les paramètres techniques (type de machine et d'outillage, orientation du support, réglages) et les paramètres de formulation (granulométrie du mélange, liant, adjuvants éventuels, teneur en eau). Les paramètres techniques sont fortement dépendants de l'expérience de l'opérateur et des conditions du site. Un bon ajustement technique permet de limiter le rebond. Cependant, la modification des paramètres de formulation permet, en plus de limiter les pertes lors de la projection, de réduire le coût environnemental du mélange initial, par l'utilisation de substituts au ciment moins générateurs de CO_2. L'étude menée s'est donc concentrée sur les effets de la formulation sur les pertes. Le béton

projeté devant remplir le rôle structurel, ses caractéristiques de résistance et de durabilité ont aussi été évaluées. Un travail de modélisation a également été réalisé pour tenter de mieux appréhender le rebond.

2. Méthodes et matériaux

2.1. Méthodes

La mise en œuvre du béton projeté par voie sèche nécessite l'utilisation d'un équipement spécifique qui a mené au développement d'un dispositif de test adapté, à la fois à la projection du béton et à la mesure des pertes.

2.1.1. Dispositif de projection et mesure du rebond

Pour réaliser les projections, un conteneur a été aménagé et est présenté sur la Figure 1. Celui-ci est divisé en deux zones. Une zone est utilisée pour l'ajustement de l'eau : cette zone est nécessaire pour ajuster la consistance du mélange avant de réaliser la projection servant aux mesures. En effet, le béton projeté par voie sèche n'est pas malaxé préalablement avec l'eau, celle-ci est ajoutée au cours de la projection. La zone d'ajustement sert donc au réglage de l'eau pour l'obtention de la consistance visée, afin de pouvoir ensuite réaliser les mesures sur un mélange homogène. Une autre zone est utilisée pour les mesures : lorsque la consistance voulue est atteinte, le béton est projeté dans un moule de 50cmx50cmx10cm en contreplaqué, ajouré sur les côtés pour permettre l'évacuation des pertes. Le moule est fixé fermement pour limiter toutes vibrations parasites.

La machine de projection est située en dehors du conteneur. Les principaux éléments constitutifs de cette machine sont la trémie pour l'arrivée du matériau sec, le barillet rotatif permettant l'envoi des matériaux dans la lance via de l'air sous une pression de 6 bars, l'anneau d'eau situé 2,5 m avant la sortie de la lance permettant l'arrivée de l'eau de gâchage, et la buse conique permettant l'accélération du mélange au moment de sa projection sur la surface. Le réglage de la teneur en eau du mélange est donc effectué de manière subjective au niveau de la lance par l'opérateur en charge de la projection.

Une bâche installée dans la zone de mesure de rebond permet de récupérer le matériau n'ayant pas adhéré au support. A l'issue de la projection, la bâche et le moule remplis, sont pesés à l'aide d'un peson (précision 200g) accroché à un palan afin de quantifier le rebond. La zone de projection est nettoyée et réinstallée avant de procéder à une nouvelle projection avec un nouveau réglage de l'eau.

Figure 1. *Dispositif expérimental pour la caractérisation du béton projeté.*

Le rebond est défini comme la proportion massique de matériau qui n'adhère pas à la surface. Le dispositif mis en place au LMDC permet de mesurer la quantité de matériaux adhérant au moule de rebond et la quantité de matériaux retombant dans la bâche de recueil des pertes. Le rebond après chaque projection est calculé comme :

$$\text{Rebond } [\%] = M_p/M_T \text{ x } 100 \qquad [1]$$

avec :

- M_P [kg] = Masse des pertes = Masse Bâche pleine – Masse bâche vide
- M_T [kg] = Masse totale de béton projeté = M_P + Mm
- Mm [kg] = Masse de béton adhérent au support = Masse moule plein – Masse moule vide

2.1.2. Résistance en compression

Pour chaque projection, la résistance en compression a été calculée comme la moyenne des résistances mesurées sur trois cubes de 50 mm de côté, sciés et rectifiés après 28j de cure humide.

Des propriétés de transfert ont été évaluées afin d'estimer la durabilité des bétons projetés. Ainsi, la porosité accessible à l'eau a été mesurée à 28j selon la norme NF P 18 – 459, par saturation des éprouvettes sous vide et pesées hydrostatiques. La perméabilité à l'air a été évaluée à l'aide du dispositif CEMBUREAU [KOL 89] sur des éprouvettes âgées de 1an séchées à 105°C jusqu'à stabilisation de leur masse. La migration des ions chlorures a été mesurée d'après la méthode NT Build 492 sur les éprouvettes âgées de 1an. Les données de résistance et de transfert correspondant à des bétons coulés, présentées à titre comparatif dans la suite du document, ont été obtenues sur des éprouvettes moulées et non sciées.

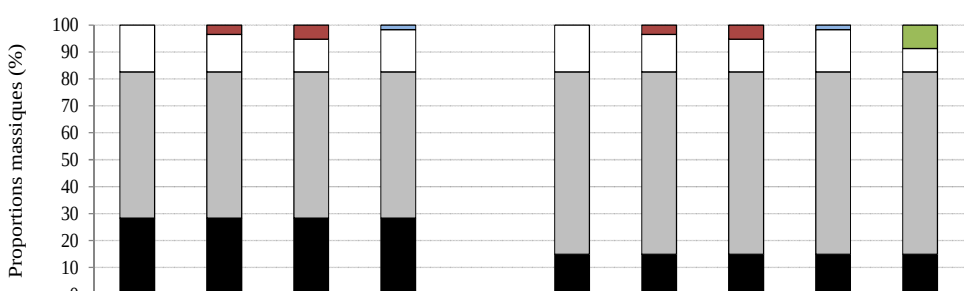
2.1.3. Teneur en eau

Il a déjà été constaté à de nombreuses reprises que l'augmentation de la teneur en eau entrainait une réduction des pertes [PAR 76] [ARM 17] [JOL 99] [ARM 97] [GER 03]. Pour une formulation donnée, plusieurs mélanges peuvent être réalisé suivant la quantité d'eau ajoutée à la lance. Une formulation n'est donc pas caractérisée par une seule valeur de rebond. Afin de caractériser au mieux les formulations, la gamme des consistances a été balayée en allant d'un mélange le plus humide possible au mélange le plus sec possible. Une valeur de rebond représentatif a été calculée pour chaque formulation et correspond au rebond pour une consistance intermédiaire [ARM 16].

2.2. Matériaux

Le choix des formulations a été fait en partant d'une référence chantier notée T-1/2, ayant un rapport (Gravillons [roulé 4/10]) / (Sable [roulé 0/4]) noté G/S de 0,52, et contenant 400kg/m^3 de ciment CEM I 52,5. La notation T-1/2 fait référence au dispositif de projection utilisé (Toulouse (T)) et à la fraction approchée du rapport G/S (ici ½). La première volonté était d'étudier l'influence de la granulométrie sur le rebond. Un mélange T-1/5 a donc été formulé, avec un rapport G/S de 0,22. L'influence du liant a ensuite été évaluée en remplaçant une partie du ciment CEM I par des additions moins génératrices de CO_2, du fait de leur statut de co-produit industriel comme la fumée de silice (FS), ou le laitier de haut fourneau (L). Du métakaolin (MK) a été utilisé du fait de sa faible production de CO_2 à la fabrication (96 kgCO_2/T contre 850 kgCO_2 /T pour le CEM I [ATH 15]). Les taux de remplacement massique du ciment par les additions sont de 10% pour la fumée de silice (FS10), 20% et 30% pour le métakaolin (MK20 et MK30) et 50% pour le laitier de haut fourneau (L50). Les notations et les formulations utilisées sont répertoriées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1. *Formulation des bétons projetés utilisés dans l'étude.*



Nom de la formulation →	T-1/2	T-1/2-MK20	T-1/2-MK30	T-1/2-FS10		T-1/5	T-1/5-MK20	T-1/5-MK30	T-1/5-FS10	T-1/5-L50
Laitier										8.7 %
Metakaolin		3.5 %	5.2 %				3.5 %	5.2 %		
Fumée de silice				1.7 %					1.7 %	
CEM I 52.5	17.4 %	13.9 %	12.2 %	15.7 %		17.4 %	13.9 %	12.2 %	15.7 %	8.7 %
Sable roulé 0/4	54.3 %	54.3 %	54.3 %	54.3 %		67.7 %	67.7 %	67.7 %	67.7 %	67.7 %
Gravillons roulés 4/10	28.3 %	28.3 %	28.3 %	28.3 %		14.9 %	14.9 %	14.9 %	14.9 %	14.9 %

3. Résultats des essais expérimentaux

3.1. Rebond

Le rebond représentatif obtenu pour les différents mélanges projetés est présenté sur la Figure 2. La dispersion des résultats est indiquée pour les différentes consistances des mélanges. On constate dans un premier

temps que le mélange de référence T-1/2, riche en gravillons, présente un rebond plus important que le mélange T-1/5, riche en sable. Ceci est en accord avec les données bibliographiques qui soulignent que les mélanges les plus riches en gros éléments génèrent plus de pertes [ARM 97] [GER 03]. De manière plus globale, deux groupes se détachent : les mélanges T-1/2 avec des rebonds représentatifs compris entre 29% et 34%, et les mélanges T-1/5 dont les rebonds varient entre 22% et 30%. L'emploi d'additions dans le mélange de base granulométrique plus fine (T-1/5), permet une plus nette réduction des pertes que dans le cas de leur emploi dans un squelette granulaire plus riche en gravillons (T-1/2).

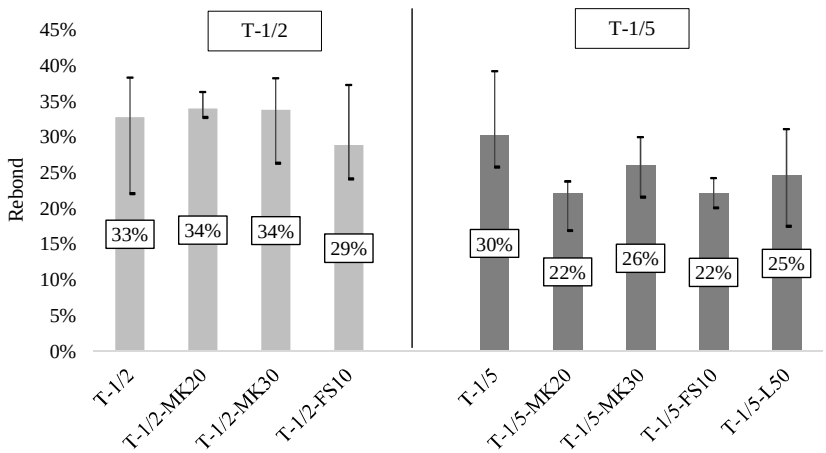


Figure 2. *Rebond moyen des différents mélanges projetés. Les barres d'erreur indiquent le rebond maximal et minimal obtenu pour chaque formulation.*

Les additions entrainent une modification de la consistance du mélange, en permettant notamment d'ajouter plus d'eau au niveau de la lance lors de la projection, tout en gardant une bonne cohésion du mélange. Ceci se vérifie lorsque le rebond est gouverné par la partie mortier du mélange, c'est-à-dire dans un mélange riche en sable du type T-1/5. Pour le mélange T-1/2, il semble que la formulation soit peu sensible à la modification du liant. Cela peut provenir du fait que ce mélange plus riche en gravillons voit son rebond gouverné par les chocs élastiques entre granulats et non par les chocs des gravillons contre la partie mortier. L'efficacité des additions pour la réduction des pertes semble donc liée au squelette granulaire du mélange dans lequel elles sont introduites.

En observant les mélanges T-1/5, il semble que les trois additions utilisées permettent une réduction des pertes. Il est intéressant de constater que l'augmentation du taux de substitution du ciment par le métakaolin de 20% à 30%, n'entraine pas de réduction supplémentaire des pertes. Ceci peut provenir d'une mauvaise défloculation de l'addition si elle est présente en trop grande quantité, gênant ainsi ses possibilités d'interaction avec l'eau de gâchage.

3.2. Résistance et porosité

Le béton projeté doit assurer un rôle fonctionnel. La résistance en compression a donc été évaluée sur l'ensemble des mélanges. La Figure 3 présente les résultats de résistance en compression moyenne sur chaque formulation de béton projeté en fonction de la porosité à l'eau (carrés bleus et losanges rouges dans l'ellipse noire, les points en noir constituent la moyenne sur les références sans additions). Sur cette figure sont aussi reportés les résultats obtenus par différents auteurs sur des bétons coulés classiques à haute performance (ellipses orange et verte), pour les mêmes conditions expérimentales. Enfin, des essais ont été réalisés avec des bétons coulés formulés comme des bétons projetés, et sont répertoriés par des croix violettes. Ces points s'inscrivent dans l'ellipse des bétons projetés.

On peut constater dans un premier temps que les bétons projetés présentent des résistances en compression équivalentes à des bétons coulés. Les références sans additions (en noir dans l'ellipse noire) présentent de meilleures résistances moyennes en compression que les mélanges projetés avec additions (en bleu et rouge). Cependant, les exigences courantes dans les CCTP pour les classes de résistance des bétons projetés sont de C35/45, et on constate que tous les bétons projetés permettent l'obtention de ce critère. Les formulations proposées permettent donc au béton projeté d'assurer leur rôle structurel.

Cependant, les porosités relevées sont plus importantes que dans le cas des bétons coulés. Cette forte porosité des bétons projetés a déjà été constatée dans la littérature [MOR 87] [GER 03] .

On constate que les bétons coulés sont en dehors de l'ellipse des bétons projetés. Les résultats obtenus sur le béton projeté seraient donc dû en grande partie à leur formulation plutôt qu'à leur mode de compaction.

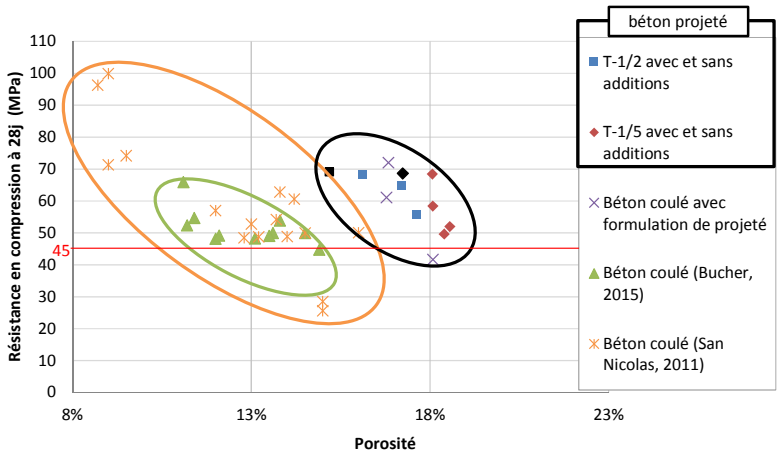


Figure 3. *Résistance en compression en fonction des porosités pour les bétons coulés et les bétons projetés. Les points noirs représentent la moyenne des résultats sur les mélanges projetés sans additions.*

Deux aspects de formulation des bétons projetés peuvent expliquer la forte porosité mesurée. D'un côté les rapports G/S recommandés par l'ACI 506 et la norme NF P 95-102 se situent entre 0,21 et 0,96, (pour les matériaux utilisés dans cette étude), ce qui ne permet pas d'atteindre un optimum de compacité comme le montre la Figure 4 [ARM 16].

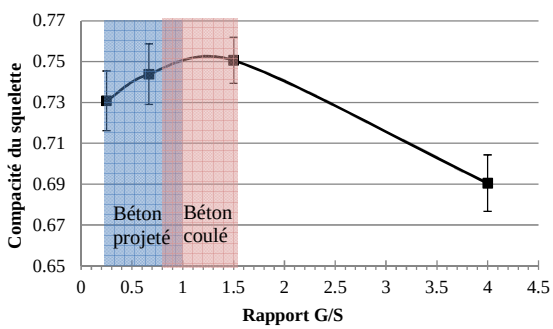


Figure 4. *Compacité du squelette granulaire en fonction du rapport Gravillon/Sable [ARM 16]*

D'un autre côté, le béton projeté contient généralement un fort dosage en ciment >380kg/m3, sans compter que ce dosage augmente, une fois la projection réalisée, du fait du phénomène de rebond et de l'enrichissement en éléments fins [FIG 99] [GER 03]. La quantité de pâte dans le béton projeté sera donc plus importante que dans un béton coulé, ce qui entraînera une augmentation de la porosité, sans altérer la résistance en compression. On peut alors se demander si cette forte porosité entrainera une dégradation des propriétés de transfert au sein de la matrice cimentaire.

3.3. Propriétés de transfert

En complément des mesures de porosité et de résistance, la perméabilité à l'air et la migration des ions chlorures ont été mesurées. Il en ressort que malgré une porosité élevée, les bétons projetés présentent de bonnes résistances au transfert d'agents agressifs au sein de leur matrice cimentaire.

3.3.1. Perméabilité intrinsèque à l'air

La Figure 5 présente les résultats de porosité des mélanges en fonction de la perméabilité intrinsèque à l'air. Les mélanges projetés sont identifiés par l'ellipse noire et les résultats sur bétons coulés, mesurés dans les mêmes conditions hydriques, aux mêmes échéances et avec les mêmes appareils, issus de la bibliographie, sont présentés dans les ellipses orange et vertes [BUC 15] [SAN 11]. On constate sur cette figure que malgré la porosité plus élevée des mélanges projetés, la perméabilité aux gaz est équivalente voire meilleure que le béton coulé. Ce résultat tend à montrer que le réseau poreux pour un béton projeté est sûrement plus tortueux et/ou moins connecté que pour un béton coulé.

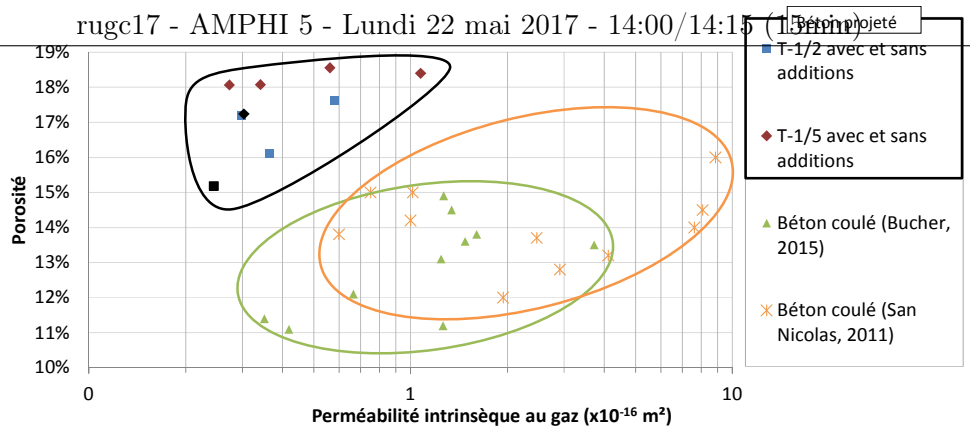


Figure 5. *Porosité des bétons projetés et coulés en fonction de la perméabilité intrinsèque au gaz. Les points noirs représentent la moyenne des résultats sur les mélanges projetés sans additions.*

3.3.2. Migration de ions chlorures

La migration des ions chlorures a été mesurée sur les bétons projetés et comparée aux valeurs relevées sur des bétons coulés dans les mêmes conditions expérimentales. Les résultats sont présentés sur la Figure 6. On peut constater que les valeurs de migration des ions chlorures sont équivalentes pour les bétons projetés et les bétons coulés, malgré une porosité plus importante pour les bétons projetés.

Les mélanges projetés ne contenant pas d'additions (points en noir), présentent une moins bonne résistance à la pénétration des ions chlorures. En effet, en présence d'additions, les ions peuvent être piégés au sein du réseau poreux soit par l'affinement du réseau dans le cas d'utilisation de fumée de silice, par adsorption sur les surfaces internes des hydrates ou des pores [BAD 15], ou par interaction chimique avec les aluminates pour former des sels de Friedel [SUR 96] dans le cas du métakaolin et du laitier.

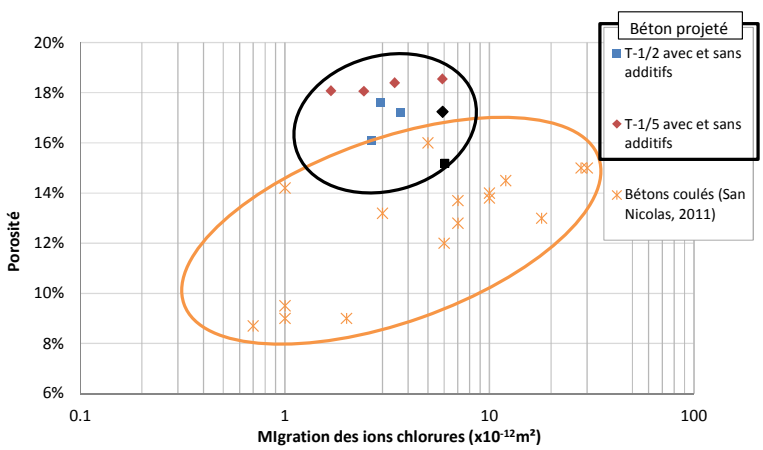


Figure 6. *Porosité accessible à l'eau en fonction de la migration des ions chlorures pour des bétons projetés (ellipse noire) et des bétons coulés (ellipse orange). Les points noirs représentent la moyenne des résultats sur les mélanges projetés sans additions.*

4. Modélisation du rebond

Un modèle de rebond a été proposé par Armelin [ARM 98], en se basant sur le principe de l'impact d'une particule sur un substrat de béton frais. Ce modèle s'appuie sur la théorie de l'indentation d'un matériau ductile par une sphère [JOH 85] et permet de calculer la probabilité de rebond d'une particule sphérique sur une surface via une méthode de Monte Carlo. Le principe du modèle est présenté sur la Figure 7. Le modèle n'est pas prédictif car il nécessite la connaissance de la consistance du béton frais, mesurée par un pénétromètre statique et dynamique, ces paramètres ne pouvant être déterminé qu'après la projection. Pour appliquer le modèle à un mélange poly-particulaire, la probabilité de rebond de chaque taille de particule est calculée et pondérée par sa représentativité sur la courbe granulométrique du mélange.

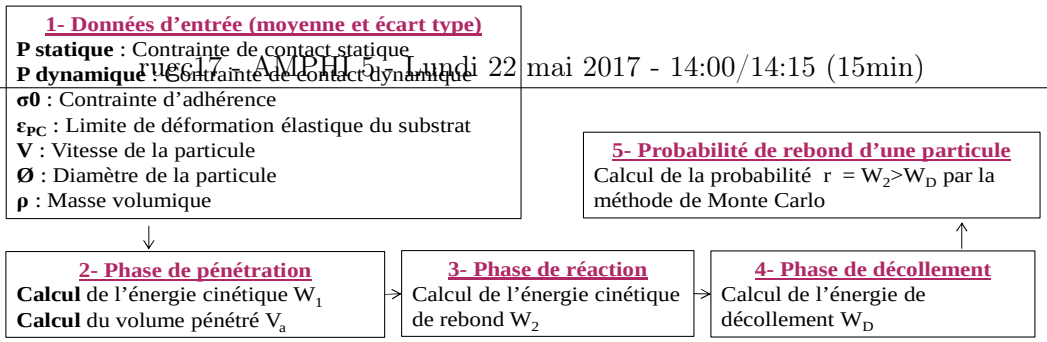


Figure 7. *Schéma de principe du modèle de calcul du rebond pour une particule*

Le modèle a été appliqué aux mélanges projetés lors de cette campagne expérimentale. La Figure 8 présente un exemple représentatif d'application du modèle. Le rebond est exprimé en fonction de la consistance (mesurées à l'aide de pénétromètres statique et dynamique [ARM 17]), pour le mélange T-1/2.

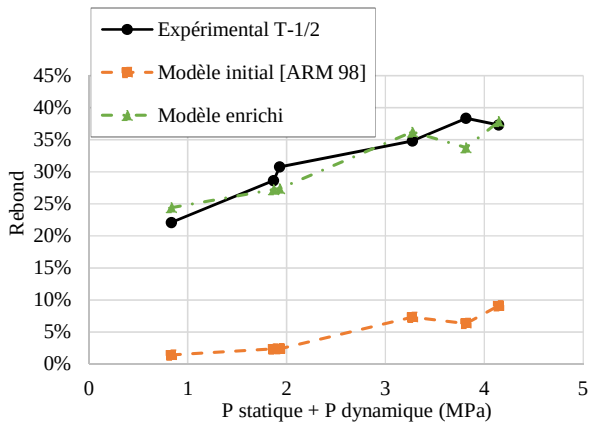


Figure 8. *Rebond en fonction de la consistance mesurée par pénétration statique et dynamique pour le mélange T-1/2[ARM 17]*

On constate que les résultats obtenus avec le modèle initial (courbe en pointillés orange) sous-estiment fortement le rebond effectivement mesuré (ligne continue noire). Ceci provient du fait que le modèle considère que toutes les particules impactant le substrat tombent sur une zone de mortier caractérisée par une consistance statique et dynamique. Or, il est tout à fait probable qu'une particule vienne impacter une autre particule, générant ainsi un choc élastique type granulat/granulat. Cette probabilité a été ajoutée au modèle initial en tenant compte du volume de gravillons dans le mélange. Le modèle ainsi enrichi a permis si de déterminer plus justement le rebond mesuré, comme le montre la courbe de validation verte sur la Figure 8. L'application du modèle enrichi nous a permis de déterminer le rebond avec une un écart moyen de rebond de 3% sur l'ensemble des valeurs expérimentales.

5. Conclusions

Le béton projeté par voie sèche est une technique présentant de nombreux avantages mais générant des pertes par rebond importantes, ce qui induit un surcoût économique et un fort impact environnemental. L'étude menée a montré que :

- Il est possible de réduire les pertes et l'impact environnemental en substituant une partie du ciment par du métakaolin, de la fumée de silice et du laitier de haut fourneau, qui sont des additions à plus faible impact environnemental que le ciment.
- La modification du liant pour la réduction des pertes semble dépendre du squelette granulaire. Un mélange trop riche en gravillons sera moins sensible à l'utilisation d'additions qu'un mélange plus riche en sable.
- L'utilisation et l'enrichissement d'un modèle de rebond tend à confirmer l'influence des chocs élastiques entre gravillons sur la quantité de rebond. Ainsi, le rebond semble gouverné à la fois par la consistance du mortier et par les chocs élastiques, donc le squelette granulaire du mélange aurait autant d'importance que le liant utilisé.

Il a été vérifié que l'emploi de ces additions pour réduire les pertes, assurait le maintien des résistances au-dessus des exigences courantes des CCTP.

Il ressort aussi de cette étude que le béton projeté présente une porosité élevée (15 à 19 %) mais que ses propriétés de transfert sont équivalentes voire meilleures qu'un béton coulé classique. De plus, l'emploi d'additions se révèle particulièrement bénéfique pour la résistance à la migration des ions chlorures au sein de la matrice. Au vu de ces résultats, la question de la pertinence de l'utilisation du critère de porosité pour évaluer la durabilité d'un béton projeté se pose et ouvre des perspectives pour l'application de l'approche performantielle.

6. Bibliographie

[ARM 97] ARMELIN, H.S., Rebound and Toughening Mechanisms in Steel Fiber Reinforced Dry-Mix Shotcrete, Thèse de doctorat, University of British Columbia, Canada, 1997.

[ARM 98] ARMELIN, H.S., BANTHIA N., « Mechanics of Aggregate Rebound in Shotcrete - (Part I) », *Materials and Structures*, vol. 31, 1998, p. 91–98.

[ARM 97] ARMELIN, H.S., BANTHIA N., MORGAN D.R., STEEVES C., « Rebond in Dry-Mix Shotcrete », *Concrete International*, n° September, 1997, p. 54–60.

[ARM 17] ARMENGAUD J., CASAUX-GINESTET G., CYR M., HUSSON B., JOLIN M.,. « Characterization of Fresh Dry-Mix Shotcrete and Correlation to Rebound », *Construction and Building Materials*, vol. 135, n° March, 2017, p. 225–232.

[ARM 16] ARMENGAUD J., Optimisation des propriétés des bétons projetés par voie sèche, Thèse de doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier, 2016.

[ATH 15] ATHIL, Déclaration environnementale produit, Ciments Courants Français, 2015.

[BUC 15] BUCHER R., Vers une utilisation rationnelle des métakaolins flash : application aux bétons, Thèse de doctorat, Université de Toulouse III Paul Sabatier, 2015.

[FIG 99] FIGUEIREDO A.D., « Rheological Behavior of Dry-Mix Shotcrete », *Second CANMET/ACI International Conference, High-Performance Concrete - Performance and Quality of Concrete Structures SP-186*, p. 113–128, 1999.

[GER 03] GEROMEY S., Evaluation des paramètres d'obtention de la qualité des bétons projetés utilisés dans des soutènements provisoires, des revêtements définitifs et des renforcements d'ouvrages, Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2003.

[JOL 99] JOLIN M., BEAUPRÉ D., MINDESS S., « Tests to characterise properties of fresh dry-mix shotcrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 29, n°5, 1999, p. 753–760.

[KOL 89] KOLLEK J.J., « The determination of the permeability of concrete to oxygen by CEMBUREAU method - a recommendation », *Materials and Structures*, vol. 22, 1989, p. 225–30.

[MOR 87] MORGAN D.R., MCASKILL N., NEILL J., DUKE N.F., « Evaluation of silica fume shotcrete » In Proc. *International Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete*, n°34. Montreal, Canada. 1987.

[PAR 76] PARKER H.W., FERNANDEZ-DELGADO G., LORIG L.J., « A Practical new approach to shotcrete rebound losses », In *ACI-SP54- Shotcrete for Ground Support*, 1976.

[SAN 11] SAN NICOLAS, R., Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash, Thèse de doctorat, Université de Toulouse III Paul Sabatier, 2011.

[BAD 15] BADOGIANNIS E., AGGELI E., PAPADAKIS V.G., TSIVILIS S., « Evaluation of chloride-penetration resistance of metakaolin concrete by means of a diffusion – binding model and of the k-value concept », *Cement and Concrete Composites*, vol. 63, n° October 2015, p. 1–7.

[JOH 85] JOHNSON, K. L., Contact Mechanics. Cambridge University Press, 1985.

[SUR 96] SURYAVANSHI, A.K., SCANTLEBURY J.D., LYON S.B., « Mechanism of Friedel's salt formation in cements rich in tri-calcium aluminate », Cement and Concrete Research, vol. 26, n° 5, 1996, p. 717–727.