

## Reologia zapraw i betonów z dodatkami mineralnymi

### Rhéologie du mortier et du béton contenant des ajouts minéraux

#### 1. Wprowadzenie

Przeprowadzono szereg badań, w których wykazano korzystny wpływ dodatków mineralnych o dużej mialkości na właściwości reologiczne betonu (1). Zastosowanie dodatków mineralnych zastępujących cement powinno w sposób prosty i ekonomiczny przyczynić się do ochrony środowiska jeżeli te dodatki są ubocznymi produktami przemysłowymi (popioły lotne, żużel wielkopiecowy, pył krzemionkowy), lub uzyskane przy małym wpływie na środowisko (metakaolinit). Te dodatki oddziałują znacznie na właściwości reologiczne kompozytów cementowych we wczesnym okresie hydratacji, co ma duży wpływ na wzrost ich wytrzymałości i na trwałość. Te dodatki mogą zwiększać płynność, zwiększać stopień zagęszczenia matrycy cementowej i poprawiać, z uwagi na ich właściwości hydrauliczne lub pucolanowe, właściwości mechaniczne betonu (2).

Celem pracy było zbadanie wpływu dodatków mineralnych na właściwości reologiczne zaprawy i betonu. Zastosowano ich do dadek zastępujący cement na poziomie 10% masowych. W celu wcześniejszego wyjaśnienia właściwości reologicznych betonu wykonano najpierw badania na zaprawach stanowiących ekwiwalent betonu z EB.

#### 2. Program doświadczeń

##### 2.1. Materiały

W badaniach stosowano cement CEM I 52,5R zgodny z normą europejską EN 197-1, o powierzchni właściwej 420 m<sup>2</sup>/kg. Piasek kwarcowy o uziarnieniu 0/4 mm o gęstości 2,6 g/cm<sup>3</sup> i nasiąkliwość 1,2% oraz żwir o uziarnieniu 4/10 mm były stosowane. Dodatki mineralne, pochodzące z Algierii były następujące: metakaolin MK, szamot CH, pucolana PZ. Metakaolin otrzymano z prażenia kaolinu w 700°C, przy czym ten ostatni pochodził z Tamazert (Wschodnia Algieria) (4). Szamot uzyskano mieląc i przesiewając odpadowe cegły. Pucolana była skałą pochodzenia wulkanicznego, pochodzącą ze złoża Bou Hamidi położonego 2,5 km od Béni-Saf (Północno-za-

#### 1. Introduction

Plusieurs études ont été menées, démontrant l'intérêt des fines particules minérales dans l'amélioration des propriétés rhéologiques du béton (1). L'utilisation des ajouts minéraux en substitution au ciment doit contribuer d'une manière simple et économique à la préservation de l'environnement, si ces ajouts sont des sous-produits industriels (cendres volantes, le laitier de haut fourneau, fumée de silice) ou développés dans un environnement (métakaolin). Ces derniers affectent de manière significative les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires à l'état frais, qui sont directement liés au développement de la résistance et de la durabilité. Les ajouts peuvent augmenter la fluidité, densifier la microstructure de la matrice cimentaire et améliorer, en raison de leur propriété hydraulique ou pouzzolanique, les performances mécaniques du béton (2).

Le but de ce travail est d'étudier l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés rhéologiques du mortier et du béton. Le taux de remplacement de 10% en poids de ciment est utilisé. Pour anticiper le comportement rhéologique du béton, une analyse a été effectuée en premier, sur le mortier de béton équivalent MBE.

#### 2. Programme expérimental

##### 2.1. Matériaux

Dans cette étude, le ciment CEM I 52.5R conforme à la norme européenne EN 197-1 (3), ayant une surface spécifique de 420 m<sup>2</sup>/kg est préférentiellement utilisé. Du sable siliceux de taille 0/4 mm ayant une densité et un coefficient d'absorption de 2.6 et 1.2% respectivement ainsi que des gravillons roulés alluvionnaires de tailles 4/10 mm sont utilisés. Des ajouts minéraux provenant d'Algérie tels que le métakaolin MK, la chamotte CH et la pouzzolane PZ ont été incorporés dans le ciment. Le métakaolin est une pouzzolane de synthèse obtenu par calcination du kaolin à 700°C originaire de la région de Tamazert (Est-Algérie) (4). La chamotte est le résultat du broyage et du tamisage des déchets

chodnia Algeria) (5). Dodawano 2% superplastyfikatora opartego na polikarboksylianach, mieszając go z wodą zarobową, a ilość tej ostatniej odpowiadała standardowej konsystencji (wodożądność), oznaczonej zgodnie z normą EN 196-1 (6). Właściwości fizyczne i skład chemiczny stosowanych materiałów podano w tablicach 1 i 2.

## 2.2. Przygotowanie zapraw i betonów

Skład zapraw, stanowiących ekwiwalent betonów ZEB (7) oraz samych betonów, wyznaczono w oparciu o program „Beton Lab. Pro” (8), przy uwzględnieniu właściwości stosowanych składników.

## 2.3. Badanie urabialności

Zbadanie urabialności betonu lub zaprawy jest potrzebne w celu scharakteryzowania kohezji w oparciu o rozplyw i opad stożka zgodnie z normą NFP 18-451 i czas wpływu z lejka zgodnie z normą NF-EN 12350-9, nawet jeżeli nie ma to być beton samozagęszczający się. W przypadku zapraw lejek jest o połowę mniejszy.

## 2.4. Właściwości reologiczne

Do pomiarów stosowano reometr RHeoCAD 200 o założonej szybkości ścinania w celu zbadania płynności betonu i zaprawy. Mieszadło śrubowe wywołuje naprężenie ścinające na próbce betonu umieszczonego w pojemniku cylindrycznym. Wszystkie badane próbki wykazały taki sam przebieg ścinania (rysunek 1). Składa on się z trzech etapów:

– Pomiar statycznej siły ścinającej Cs

Po dwóch minutach od umieszczenia próbki w pojemniku poddaje się go naprężeniu ścinającemu przy bardzo małej szybkości obrotowej 0,08 obrotu/s, przy czym wcześniej próbka nie była narażona na żadne naprężenia z wyjątkiem mieszania składników. Pomiaru siły ścinającej Cs dokonuje się po osiągnięciu wartości maksymalnej (etap 1 na rysunku 1).

– Ustalenie krzywej płynięcia

Celem etapu drugiego jest charakterystyka warunków ustalonego ścinania. Próbkę poddaje się ścinaniu przy szybkim wzroście naprężenia ścinającego od 0 do 1 obrotu/s w celu zniszczenia jej struktury i doprowadzenia do zmian jej właściwości reologicznych w funkcji czasu. Po ustaleniu się równowagi dynamicznej pomiędzy naprężeniem ścinającym i granicą płynięcia zmniejsza się szybkość skokowo, a ta zmiana wynosi 0,017 obrotu/s. ten spadek szybkości powinien doprowadzić do ustalenia się nowego stanu równowagi.

– Właściwości tiksotropowe

Pozostawia się próbkę w spoczynku na dwie minuty. Następnie powoduje się szybkie zniszczenie struktury zwiększając szybkość ścinania od 0 do 1 obrotu/s oraz szybki spadek do 0,0033 obrotu/s

Tablica 1 / Tableau 1

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE MATERIAŁÓW  
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES MATÉRIAUX

Materiały Matériaux	Cement Ciment	MK	CH	PZ
Powierzchnia właściwa, Surface spécifique, m <sup>2</sup> /kg	420	870	870	820
Gęstość/Densité	3.12	2.54	2.83	2.79
Aktywność pucolanowa, Activity minérale, mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g	-	137.5	126.1	149.8
Wodożądność Demande en eau, %	27.4	28.6	27.4	27.6
Superplastyfikator Superplastifiant				
Gęstość/Densité	1.07			
Zawartość chloru Teneur en chlore	< 1%			
pH	6±1			

des briques. La pouzzolane est un matériau d'origine volcanique extrait du gisement de Bou Hamidi situé à 2.5 km de Béni- Saf (Nord- Ouest Algérie) (5). Un taux de 2% de superplastifiant à base de polycarboxylate phosphonate modifiés a été directement incorporé dans l'eau de gâchage dont la quantité correspond à la consistance normalisée (demande en eau), déterminée en suivant la norme EN 196-1 (6) (test standard de Vicat). Les propriétés physiques et les compositions chimiques de ces matériaux sont regroupées dans les tableaux 1 et 2.

## 2.2. Préparation des mortiers et des bétons

La formulation des mortiers de bétons équivalents MBE (7) et des bétons est déterminée à partir d'un logiciel d'aide à la formulation des bétons « BétonLab.Pro » (8) en tenant compte des différentes données relatives aux matériaux utilisés.

## 2.3. Tests d'ouvrabilité

La caractérisation de l'ouvrabilité du béton ou du mortier est nécessaire afin d'apprécier au moins sa cohésion (essai d'affaissement ou d'étalement selon la norme NF P 18-451), et sa mobilité en milieu confiné (essai à l'entonnoir selon la norme NF EN 12350-9) même s'il n'est pas avéré comme étant autoplaçant. Les dispositifs d'essai sont à l'échelle ½ dans le cas des mortiers.

Tablica 2 / Tableau 2

SKŁAD CHEMICZNY MATERIAŁÓW, % MASOWE  
COMPOSITION CHIMIQUE DES MATÉRIAUX, %, EN MASSE

%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF	Cl <sup>-</sup>
Ciment	19.85	4.80	2.75	63.60	1.45	3.45	0.90	0.15	2.20	0.002
CH	59.62	12.65	5.41	13.87	2.46	0.53	2.17	0.57	1.88	0.012
PZ	4.78	16.53	9.01	10.97	4.59	0.17	1.15	3.42	6.55	0.014
MK	58.32	35.36	1.18	1.33	0.21	0.31	1.13	0.15	2.01	0.012

i obserwuje się szybkość odbudowy struktury w czasie 200 s. Na tej podstawie wyznacza się wskaźnik odbudowy struktury na podstawie początkowej i końcowej wielkości siły ścinającej w stosunku do założonej szybkości ścinania wynoszącej 0,0033 obrotu/s.

## 2.5. Skład zapraw i betonów

Składy betonów i ekwiwalentnych zapraw podano w tablicach 3 i 4. Skład betonu odniesienia zmodyfikowano zastępując 10% cementu dodatkiem mineralnym. Zawartość wody utrzymano na Tablica 3 / Tableau 3

SKŁAD BETONÓW, kg/m<sup>3</sup>

COMPOSITION DES BÉTONS, kg/m<sup>3</sup>

Beton Béton	BR <sup>1</sup>	BMK <sup>2</sup>	BPZ <sup>3</sup>	BCH <sup>4</sup>
Cement Ciment	400	360	360	360
Piasek Sable	861	861	861	861
Żwir Gravier	861	861	861	861
MK	-	40	-	-
PZ	-	-	40	-
CH	-	-	-	40
Et <sup>5</sup>	188	188	188	188
Eeff <sup>6</sup>	160	144	144	144
SP	32	32	32	32

Uwagi : <sup>1</sup>beton odniesienia, <sup>2</sup>z metakaolinem, <sup>3</sup>z pucolaną, <sup>4</sup>z szamotem, <sup>5</sup>woda całkowita, <sup>6</sup>woda efektywna – przyjęto według Powersa w/c = 0,4  
BR: Béton de référence; BMK, BPZ, BCH: Béton avec 10% de métakaolin, 10% de pouzzolane, ou avec 10% de chamotte respectivement. Et: Eau totale; Eeff: Eau efficace; SP: Superplastifiant.

Tablica 4 / Tableau 4

SKŁADY ZAPRAW, kg/m<sup>3</sup>

COMPOSITION DES MORTIERS, kg/m<sup>3</sup>

Mortier	MR	MMK	MPZ	MCH
Ciment	600	538	538	538
Sable	1395	1400	1392	1392
MK	-	60	-	-
PZ	-	-	60	-
CH	-	-	-	60
Ep	39	39	39	39
Eg	226	225	225	225
SP	4.8	4.8	4.8	4.8

Ep : woda wstępnie zwilżająca zaprawę, Eg : woda zarobowa

MR: Mortier référence; MMK, MPZ, MCH: Mortier avec 10% de métakolin, 10% de pouzzolane, ou 10% de chamotte respectivement. Eg: Eau de gâche; Ep: Eau de préhumidification.

## 2.4. Tests rhéologiques

Le rhéomètre de type RheoCAD 200 à vitesse imposée est utilisé pour compléter la caractérisation du comportement rhéologique des bétons. Ce rhéomètre est dérivé d'une conception couette qui permet de mesurer la variation du couple résistant de la vitesse du mobile de cisaillement. Le mobile hélicoïdal utilisé, vient cisailier le matériau placé dans une cuve cylindrique. Tous les mortiers ou bétons testés ont subi le même historique de cisaillement (Figure 1). Il se décompose en 3 étapes :

– Mesure du couple seuil statique Cs

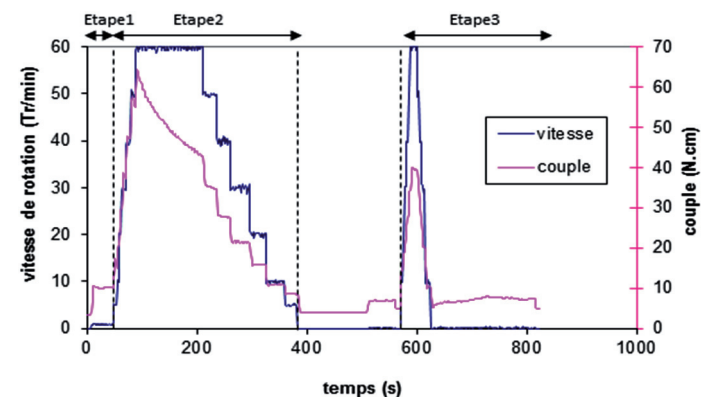
Deux minutes après que l'échantillon ait été placé dans la cuve, une faible vitesse de 0.08tr/s est imposée au béton vierge de toute sollicitation (à part le malaxage). Le couple seuil statique Cs est déterminé en relevant la valeur maximale atteinte au moment de la déstructuration du béton (étape 1 de la figure 1).

– Etablissement de la courbe d'écoulement

La deuxième étape consiste à caractériser l'échantillon en régime permanent d'écoulement. Le matériau est soumis à une montée rapide en vitesse de 0 jusqu'à 1tr/s afin de le déstructurer et de s'affranchir de ses propriétés dépendantes du temps. A partir de cette vitesse un régime permanent d'écoulement est attendu en observant la stabilité du couple ; lorsque cette stabilité est atteinte, une vitesse inférieure est appliquée au matériau par pas de 0,017 tr/s. Le changement de vitesse est effectif lorsque le régime permanent en écoulement est atteint.

– Propriétés de thixotropie

Le matériau testé en écoulement est laissé au repos durant deux minutes. Il est ensuite déstructuré par une montée rapide en vitesse de 0 à 1tr/s, une descente tout aussi rapide en vitesse jusqu'à 0,0033 tr/s est opérée, puis on observe l'intensité de la restructuration de la suspension à travers l'évolution du couple dans un intervalle de temps fixé (200 s). Un indice de restructuration est évalué à partir de la variation relative entre les couples final et initial à la vitesse imposée de 0,0033 tr/s.



Rys. 1. Typowy przykład przebiegu ścinania zaprawy i betonu. Lewa oś rzędnych – szybkość obrotowa ; prawa – naprężenie ścinające

Fig. 1. Exemple typique de l'historique du cisaillement des mortiers et des bétons

stałym poziomie we wszystkich mieszankach betonowych w celu stwierdzenia wpływu dodatku na właściwości próbek.

### 3. Wyniki i ich omówienie

#### 3.1. Urabialność

Uzyskane wyniki podano w tablicy 5 (zaprawy) i 6 (betony). Wynika z nich, że opad stożka Abramsa nie uległ zmianie w przypadku zaprawy z dodatkiem szamotu, a był nieco mniejszy i taki sam w przypadku zapraw z metakaolinem (MK) i pucolaną (PZ).

Czas wypływu z lejka jest taki sam jak w przypadku wzorca zapraw z PZ i CH, jednak jest znacznie dłuższy dla próbki zaprawy z MK. W przypadku betonów największy wpływ ma czas wypływu z lejka mają metakaolin i pucolana. Natomiast urabialność betonu z szamotą jest zbliżona do wzorca, jednak czas wypływu z lejka jest znacznie większy.

#### 3.2. Właściwości reologiczne zapraw

##### 3.2.1. Krzywe płynięcia i badanie tiksotropii

W porównaniu z zaprawą odniesienia dodatki mineralne MK i PZ zwiększają znacznie statyczną siłę ścinającą  $C_s$ , która określa naprężenie ścinające (granice płynięcia). Natomiast zwiększenie  $C_s$  w przypadku dodatku SH jest nieznaczne (tablice 7 i 8). Na rysunku 2 pokazano krzywe płynięcia wszystkich 4 zapraw. Dodatkowo trzeba stwierdzić, że występuje nieliniowa zależność pomiędzy średnią wartością  $C$  a średnią szybkością obrotową  $V$ . Równania regresji w postaci  $C = C_0 + BV^n$  (rysunek 2) dają wykładnik potęgowy  $n$  większy od 1 świadczący o wzroście lepkości ze wzrostem szybkości ścinania. Ta właściwość jest wyraźnie zaznaczona w przypadku szamotu a słabiej dla dodatków mineralnych MK i PZ. Jest to głównie spowodowane stosowaniem superplastyfikatora, natomiast dodatki mineralne tylko zmniejszają lub zwiększają to działanie (9). Wielkość dynamicznej równowagi naprężenia ścinającego  $C_0$  z granicą płynięcia zmienia się z tymi samymi zależnościami regresyjnymi, które wyprowadzono dla statystycznej siły ścinającej. Wyniki uzyskane reometrem pokazują więc, że dodatek szamotu nie ma wpływu na płynięcie próbek podczas gdy ulegają one zmianie w stosunku do wzorca w przypadku dodatków MK i PZ (tablice 7 i 8, rysunek 2).

##### 3.2.2. Tiksotropia

Na rysunku 3 pokazano równowagę dynamiczną zapraw bez i z dodatkami mineralnymi przy utrzymywaniu małej szybkości obrotowej. Pokazuje ona, że odbudowa struktury materiału zmienia się w zależności od rodzaju dodatku mineralnego. Jest ona scharakteryzowana przez wskaźnik odbudowy struktury (powrót do stanu wyjściowego zaprawy). Obliczenie tego wskaźnika  $I_{str}$  określonego przez względną zmianę początkowego i końcowego naprężenia ścinającego w przypadku stałej szybkości 0,0033 obr/s. Prowadzi on do następującego szeregu:  $I_{struct}(MPZ) = 1,06 > I_{struct}(MMK) = 1 > I_{struct}(MR) = 0,40 > I_{struct}(MCH) = 0,26$ .

### 2.5. Composition des mortiers et des bétons

Les compositions des bétons et de leurs mortiers équivalents sont respectivement indiquées dans le tableaux 3 et 4. A partir d'une formulation de référence, trois formulations ont été déduites en substituant 10% de la masse de ciment par les ajouts. La teneur en eau a été maintenue constante pour toutes les formulations afin d'apprécier l'effet de chaque ajout sur les propriétés des matériaux.

### 3. Résultats et discussions

#### 3.1. Propriétés d'ouvrabilité

Les résultats trouvés sont indiqués dans les tableaux 5 (mortiers) et 6 (bétons). Ils montrent que l'étalement des mortiers au mini-cône d'Abrams n'est pas altéré avec l'utilisation de la chamotte alors qu'il est de la même intensité avec le métakaolin (MK) et la pouzzolane (PZ).

Par ailleurs, l'écoulement en milieu confiné (entonnoir) est identique à la référence lorsque PZ et CH sont incorporés mais il est significativement plus lent avec l'utilisation de MK. A l'échelle des bétons, il est constaté les mêmes tendances : par rapport à la composition de référence, ce sont le métakaolin et la pouzzolane qui altèrent le plus l'écoulement.

Le béton incorporant la chamotte (BCH) possède des caractéristiques d'ouvrabilité qui s'approchent de celles de BR mais avec un temps d'écoulement nettement plus grand.

Tablica 5 / Tableau 5

URABIALNOŚĆ ZAPRAW

CARACTÉRISTIQUES D'OUVRABILITÉ DES MORTIERS

Zaprawa Mortier	MR	MMK	MPZ	MCH
Opad stożka, Dmoy, cm	27	21	21	25
Czas wylywu z lejka, Temp d'ecoulement $T_{VF}$ , s	8	12	8	7
Gęstość Densité	2.31	2.31	2.31	2.32

Tablica 6 / Tableau

URABIALNOŚĆ BETONÓW

CARACTÉRISTIQUES D'OUVRABILITÉ DES BÉTONS

Béton	BR	BMK	BPZ	BCH
Dmoy cm	42	29	0	38
Aff, cm	21	15.5	1	19.5
$T_{VF}$ , s	14	Blockage	Blockage	59
Densité	2.42	2.40	2.41	2.39

Uwaga: Aff – rozplyw w cm

Tablica 7 / Tableau 7

WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE ZAPRAW

CARACTÉRISTIQUES RHÉOLOGIQUES DES MORTIERS

Mixture	MR	MMK	MPZ	MCH
Cs	10.5±1.58	23.4±3.51	21.1±3.17	11.9±1.78
C <sub>0</sub>	7.53±0.75	14.52±0.14	15.34±0.15	7.57±0.76

Tablica 8 / Tableau 8

WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE BETONÓW

CARACTÉRISTIQUES RHÉOLOGIQUES DES BÉTONS

Mixture	CR	CMK	CPZ	CCH
Cs	106.6±16	330.3±49.54	337.4±50.61	126.5±19
C <sub>0</sub>	52.62±5.26	-	-	64.98±6.50

Ten szereg pokazuje, że w stosunku do zaprawy odniesienia, właściwości tiksotropowe są wyraźniej zaznaczone w przypadku dodatku pucolany i metakaolinu, a najslabiej przy dodatku szamotu.

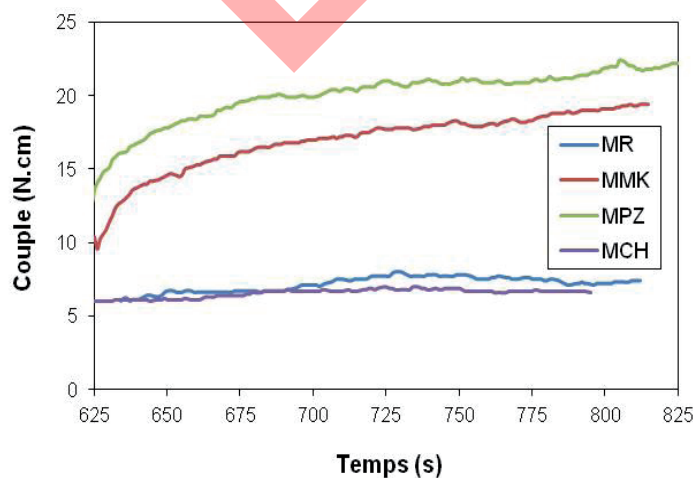
### 3.2.3. Właściwości reologiczne betonów

Badania czterech przygotowanych betonów po 20 minutach od sporządzenia mieszanki. Tylko dwa betony BR i BCh udało się zbadać za pomocą reometru i ich krzywe płynięcia przedstawiono na rysunku 4. Pokazują one, że zależność naprężenia ścinającego od średniej szybkości ścinania w przypadku betonów BR i BCh świadczą o wzroście lepkości ze wzrostem szybkości ścinania. Krzywe te mają w równaniu regresji wykładnik potęgowy większy od 1 (n>1).

BR  $C = 52,62 + 0,066 \cdot V^{1.69}$

BCH  $C = 64,98 + 0,350 \cdot V^{1.28}$

Tak więc zachowanie to, związane z dodatkiem mineralnym i superplastyfikatorem występuje w przypadku betonu. Stosowanie dodatku MK i PZ powoduje znaczny wzrost lepkości plastycznej mieszanek betonowych BMK i BPZ co wyraża się znacznym zwią-



Rys. 3. Zmiana równowagi dynamicznej w funkcji czasu

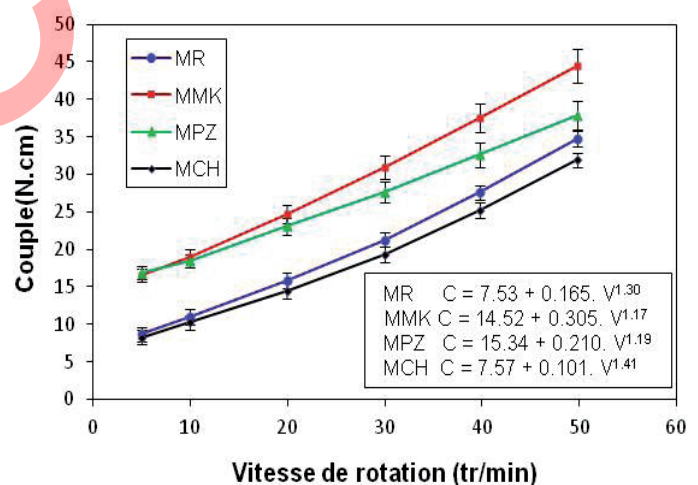
Fig. 3. Evolution du couple dans le temps- Thixotropie

## 3.2. Rhéologie des mortiers

### 3.2.1. Courbes d'écoulement et couple seuil

Par rapport à la référence, les ajouts type MK et PZ engendrent une augmentation significative du couple seuil statique Cs qui définit leur seuil d'écoulement. En revanche, l'augmentation de Cs n'est pas significative lorsque CH est utilisée (Tableau 7 et 8). La figure 2 représente l'évolution moyenne (couple /vitesse de rotation) pour les 4 mortiers étudiés. Plusieurs commentaires sont à faire :

Une relation non linéaire existe entre les valeurs du couple moyen C et la vitesse de rotation moyenne V. Une régression aux moindres carrés utilisant une expression de type  $C = C_0 + B \cdot V^n$  (Figure 2) donne un exposant n supérieur à 1, représentatif du comportement rhéoépaississant. Ce comportement, par rapport au mélange de référence est accentué avec la chamotte et amoindri avec MK et PZ. Ce rhéoépaississement est dû essentiellement à l'utilisation d'un superplastifiant, les ajouts minéraux ne faisant que le modérer ou l'accroître [9]. Les valeurs du couple seuil dynamique C<sub>0</sub> (valeur du couple à vitesse nulle) suivent le même classement que celui établi pour le couple seuil statique Cs. Les résultats obtenus au rhéomètre montrent donc que l'écoulement reste équivalent à celui de la référence lorsque la chamotte CH est incorporée tandis qu'il est altéré avec l'utilisation de MK et PZ (tableaux 7 et 8, Figure 2).



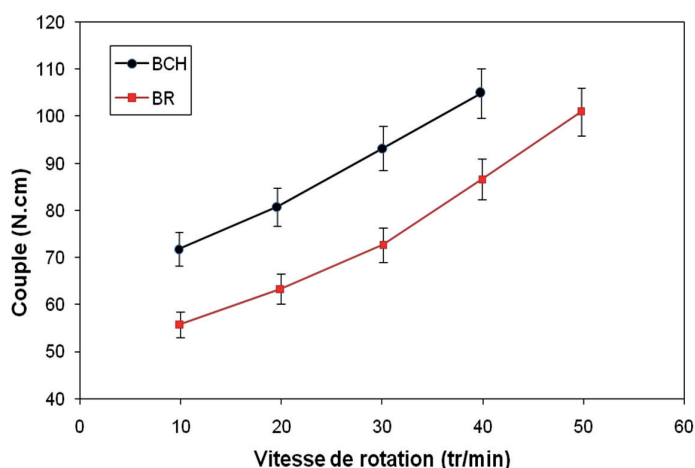
Rys. 2. Krzywe płynięcia zapraw w funkcji szybkości obrotowej

Figure 2. Variation du couple moyen en fonction de la vitesse de rotation moyenne des mortiers

### 3.2.2. Thixotropie

La figure 3 illustre l'évolution du couple après déstructuration pour les mortiers avec et sans ajouts lorsqu'une faible vitesse de rotation est maintenue. Elle montre que la restructuration du matériau diffère avec le type d'ajout. Cette dernière est caractérisée par un indice de restructuration (degré de retour à l'état initial du mortier). Le calcul de cet indice  $I_{struct}$  défini par la variation relative entre les couples final et initial à la vitesse imposée de 0,0033 tr/s, conduit au classement suivant :

$I_{struct}(MPZ) = 1.06 > I_{struct}(MMK) = 1 > I_{struct}(MR) = 0.40 > I_{struct}$



Rys. 4. Krzywe płynięcia betonów w funkcji szybkości obrotowej

Fig. 4. Variation du couple moyen en fonction de la vitesse de rotation moyenne

szeniem granicy płynięcia w stosunku do betonu porównawczego. MK i PZ wymagają więc dostosowania zawartości domieszki i wody zarobowej w celu obniżenia granicy płynięcia i lepkości plastycznej. A więc stała zawartość wody w przypadku betonów BPZ i BMK powoduje dużą lepkość plastyczną.

#### 4. Podsumowanie

Koncepcja zaprawy stanowiącej ekwiwalent betonu (ZEB) wydaje się dawać zadawalające wyniki w zakresie objętym doświadczeniami i pozwala na uzyskanie pełniejszych badań urabialności i właściwości reologicznych, w porównaniu z betonem. Więcej, jeżeli można było pewne właściwości zbadać w przypadku betonu to wykazywały one ten sam rodzaj zmian co ZEB. W przypadku obu materiałów stwierdzono, że przy stałych innych czynnikach, zastępowanie 10% cementu pucolaną lub metakaolinem wywołuje zmiany płynności, w przeciwieństwie do szamotu. Te zmiany mogą także być przypisane zwiększeniu właściwości tiksotropowych mieszanek z dodatkiem PZ i MK. Jest oczywiste, że szereg właściwości dodatków mineralnych będzie miało wpływ na płynność: duża mialkość MK i PZ w porównaniu z CH, co powoduje zwiększenie zawartości drobnych cząstek. Może to także zaburzyć rozmieszczenie ziaren cementu w odróżnieniu od szamotu, którego rozkład ziarnowy jest zbliżony do piasku. W związku z tym, przy przyjętym dodatku wody zarobowej i upłynniacza może to powodować utworzenie matrycy o większym stopniu flokulacji, zawierającej duże konglomeraty (faza o składnikach < 100 µm zawierająca wodę i upłynniacz) w przypadku MK i PZ. Należało więc zmienić dodatek wody i upłynniacza aby uzyskać strukturę bardziej rozproszoną i o większej płynności. Natomiast dodatek CH raczej wzbogacił frakcję piaskową w drobniejsze cząstki i wymagał jedynie pewnego zwiększenia wody zarobowej w celu poprawy urabialności mieszanki.

(MCH) = 0.26. Ce classement montre que, par rapport au mortier de référence, le caractère thixotrope est le plus marqué avec la pouzzolane et le métakaolin et le moins marqué avec la chamotte.

#### 3.2.3. Rhéologie des bétons

Quatre bétons ont été élaborés et testés au rhéoCAD à 20 minutes d'âge: BR, BMK, BCH, BPZ. Seuls les bétons BR et BCH ont pu être analysés au rhéomètre et leurs courbes d'écoulement ont été tracées sur la figure 4. Elle montre la relation entre le couple moyen et la vitesse de rotation moyenne qui décrit les courbes définissant un comportement rhéoépaississant des bétons BR et BCH. Ces courbes modélisées donnent en effet un coefficient  $n > 1$ .

$$\text{BR} \quad C = 52.62 + 0.066 \cdot V^{1.69}$$

$$\text{BCH} \quad C = 64.98 + 0.350 \cdot V^{1.28}$$

Le comportement rhéoépaississant en présence d'ajouts couplé au superplastifiant est également confirmé à l'échelle du béton. L'utilisation des ajouts tels que MK et PZ entraîne donc une rigidification de la structure des bétons BMK et BPZ (moindre mesure pour BCH) qui s'est traduite par une augmentation importante de leur couple seuil par rapport à celui de BR. MK et PZ demandent donc un ajustement du superplastifiant et de l'eau pour réduire respectivement le seuil et les viscosités. Ainsi à teneur en eau constante, les bétons BPZ et BMK sont nettement moins aptes à s'écouler.

#### 3.2.4. Bilan et analyse

Le concept de mortier de béton équivalent (MBE) apparaît tout à fait pertinent et suffisant pour discriminer, dans les limites du contexte expérimental, l'effet des ajouts minéraux étudiés sur l'écoulement puisqu'il a permis de collecter, contrairement à l'échelle du béton, des données complètes d'ouvrabilité et de rhéologie. De plus, quand les propriétés étaient mesurables sur béton, elles s'ordonnaient de la même manière que celles obtenues sur MBE. Aux deux échelles, il a été clairement noté que tout étant égal par ailleurs, la substitution de pouzzolane PZ ou de métakaolin MK au ciment à hauteur de 10% en masse a entraîné une altération de l'écoulement contrairement à l'incorporation de chamotte pour le même taux de substitution. Cette altération peut aussi être reliée au caractère thixotrope prononcé lorsque PZ et MK sont utilisés. Comme attendu, plusieurs propriétés des ajouts vont jouer un rôle sur l'écoulement : la granulométrie très fine de MK et de PZ par rapport à CH entraîne un volume et un nombre de particules plus importants. De plus l'arrangement des grains de ciment est probablement plus perturbé avec MK et PZ qu'avec CH dont la majorité des grains est plutôt dans la dimension d'un sable. Ainsi, pour des quantités d'eau et de superplastifiant données, il est possible qu'une structure très flocculée, voire coagulée de la matrice (phase contenant les éléments < 100 µm, l'eau et le superplastifiant) soit prédominante avec l'incorporation de MK ou PZ. Il faudrait donc agir à la fois sur les quantités d'eau et de superplastifiant pour atteindre une structure plus dispersée et une meilleure aptitude à l'écoulement. En revanche, l'incorporation de CH a plutôt pour

## 5. Wnioski

Głównym celem badań było wyjaśnienie możliwości zastąpienia pewnej części cementu przez przemysłowy produkt uboczny lub miejscowe dodatki mineralne; były to więc odpadowe cegły szamotowe, pucolana i metakaolin. Z badań reologicznych uzyskanych zapraw i betonów można wyciągnąć szereg wniosków.

Najważniejsze są następujące:

- zastąpienie 10% cementu tymi dodatkami zmniejsza płynność mieszanki betonowej i zaprawy przy zastosowanym dodatku upłynniacza i wody zarobowej,
- jest prawdopodobne, że dodatek metakaolinu i pucolany naturalnej powoduje powstawanie struktury o większym stopniu flokulacji,
- powoduje to także wyraźniej zaznaczone właściwości tiksotropowe mieszanki z tymi dodatkami, co wymaga zwiększenia wody zarobowej i/lub dodatku upłynniacza.

## Literatura / Références

1. M. Cyr, M. Mouret, Proceedings of the seventh CANMET/ACI international Conference on Superplasticizers and Other Chemical admixtures in concrete, Allemagne, 241-255 (2003).
2. C. K. Park, M. H. Noh, T. H. Park, Cem. Concr. Res., **35**, 842-849 (2005).
3. NF EN 197-1: Cement-part 1, AFNOR. (2001).
4. D. Merabet, H. Belkacemi, Annales de chimie, **28**, 61-83 (2003).
5. N. B. Belaribi, M. Semcha, L. Laoufi, Can.j.Civ.Eng., **30**, 580-84 (2003).
6. NF EN 196-1: Method of testing cement-part 1: Determination of strength, AFNOR. (2006).
7. A. Schwaetzentruer, C. Catherine, Materials and structures, **33**, 475-482 (2000).
8. T. Sedran, F. De Larrard, Betonl La Pro 2, Computer Aided Mix Design Software, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (2000).
9. M. Cyr, C. Legrand, M. Mouret, Cem. Concr. Res., **30**, 1477-1483 (2000).
10. B. B. Sabir, S. Wild, J. Bai, Cem.Concr.Com., **23**, 441-454 (2001).
11. A. Tfraoui, G. Escadeillas, S. Lebaïli, T. Vidal, Constr. Build. Mater., **23**, 669-674 (2009).
12. M. Nehdi, M. Mindess, and P.-C. Aitcin, Cem.Concr. Res., **28**, 687-697 (1998).
13. G. Banfill, 11<sup>th</sup> ICCO, 1, 50-62 (2003).

effet d'enrichir le sable en fines et de nécessiter une augmentation de la quantité d'eau du mélange pour améliorer l'ouvrabilité.

## 4. Conclusions

L'intérêt majeur qui a été à l'origine de cette étude est la possibilité de remplacer une partie d'un matériau industriel qui est le ciment par des ajouts minéraux locaux et pas chers comme la pouzzolane naturelle, les déchets de la brique (la chamotte) et le métakaolin. Les propriétés rhéologiques des différents mortiers et bétons ont été étudiés. Plusieurs conclusions peuvent être déduites des résultats de ces investigations sur les mortiers et les bétons:

Les tests rhéologiques et mécaniques effectués ont révélé l'influence du taux de 10% de métakaolin MK, de chamotte CH ou de pouzzolane PZ sur le comportement des mortiers et des bétons. Ils montrent que ces ajouts présentent une action de raidissement sur les mortiers et les bétons lors de leur écoulement pour des quantités d'eau et de superplastifiant données. Il est possible qu'une structure très flocculée de la matrice soit prédominante avec l'incorporation surtout de MK ou PZ. Celle-ci est reliée au caractère thixotrope prononcé lorsque PZ et MK sont utilisés. Il faudrait donc agir à la fois sur les quantités d'eau et de superplastifiant (en les augmentant) pour atteindre une structure plus dispersée, une meilleure aptitude à l'écoulement et une meilleure ouvrabilité.