



Projet National de recherche et développement

Thème 2

Evolution de la rhéologie du béton frais en fonction du pourcentage et de l'état de pré-saturation des granulats recyclés, et en fonction du malaxage

Rédigé par Vu Nam Nguyen, Franck Cassagnabère,
Martin Cyr et Michel Mouret

R/14/RECY/012
LC/12/RECY/11
Septembre 2014



Projet National de recherche et développement

FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Evolution de la rhéologie du béton recyclé frais

RAPPORT N° : R/14/RECY/012

DATE D'ETABLISSEMENT : Septembre 2014

AUTEUR(S) : M. CYR, M. MOURET, F. CASSAGNABERE, VN. NGUYEN

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : LMDC

THEME DE RATTACHEMENT : 2

LETTRE DE COMMANDE : LC/12/RECY/11

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79

Résumé

Ce rapport donne les résultats du comportement à l'état frais de bétons contenant des sables et gravillons recyclés (C25/30 et consistance S4). Le but principal était d'étudier l'évolution de la rhéologie des bétons entre 0 et 90 minutes, en fonction de la teneur en eau des granulats recyclés (absorption – Ab). La résistance en compression à 28 jours a aussi été déterminée.

Les mélanges étudiés ont inclus : un béton avec 100% de gravillon recyclés utilisés à trois niveaux de saturation (Absorption + 1%, 0,75Ab, 0,3Ab) et un béton avec 30% massique de sable recyclé (1,2Ab, 1,0Ab, 0,87Ab, 0,5Ab, 0,33Ab). La quantité totale d'eau est demeurée constante pour chaque type de composition (100% de gravillon recyclé ou 30% de sable recyclé).

Les résultats ont montré que les affaissements ont été dégradés dans le temps, peu importe le taux de saturation des granulats recyclés. Les affaissements les moins bons ont été obtenus pour les granulats saturés ou sursaturés. Les viscosités (déduites de courbes couple-vitesse de rotation) ont augmenté dans le temps, spécialement pour les taux de saturation les plus bas. Les viscosités les plus faibles ont été obtenues lorsque les granulats recyclés étaient proches de leur niveau de saturation, sans être sursaturés.

La résistance en compression des bétons était :

- plus faible lorsque les gravillons recyclés étaient sous-saturés ;
- pratiquement non affectée pour les sables recyclés sous ou sursaturés ;
- diminuée lorsque les sables recyclés étaient proches de leur niveau de saturation.

Abstract

This report gives the results of the fresh state behavior of concretes containing recycled fines or coarse aggregates (C25/30 and S4 consistency). The main goal was to study the evolution of the rheology of concrete between 0 and 90 min, as a function of the water content of the recycled aggregates (absorption – Ab). The compressive strength at 28 days of age was also determined.

The mixtures studied included: a concrete with 100% of recycled coarse aggregates used at three saturation levels (Absorption + 1%, 0,75Ab, 0,3Ab), and a concrete with 30% by weight of fine recycled aggregates (1,2Ab, 1,0Ab, 0,87Ab, 0,5Ab, 0,33Ab). The total water content remained constant for each design (100% recycled coarse aggregates or 30% recycled sand).

The results showed that the slump decreased over time, whatever the initial saturation levels of the recycled aggregates. The worst slumps were obtained for saturated and over-saturated aggregates. The viscosities (deduced from torque-rotation speed curves) increased over time, especially for the lower saturation levels. The lower viscosities were obtained when the recycled aggregates were near their saturation level, without being over-saturated.

The compressive strength of the concretes was:

- lower when the coarse aggregates were under-saturated;
- almost unaffected for fine aggregates under or over-saturated;
- decreased when the fine aggregates were near their saturation level.

Sommaire

1	INTRODUCTION	4
2	PHASE 1	4
2.1	PROCOLE EXPERIMENTAL	4
2.1.1	<i>Constituants de base</i>	<i>4</i>
2.1.1.1	Ciment	4
2.1.1.2	Filler	4
2.1.1.3	Adjuvant	4
2.1.1.4	Granulats	5
2.1.2	<i>Matériaux – Bétons</i>	<i>6</i>
2.1.2.1	Pré-humidification des granulats	6
2.1.2.2	Formulations	6
2.1.3	<i>Malaxage –Échantillonnage.....</i>	<i>8</i>
2.1.3.1	Protocole de malaxage	8
2.1.3.2	Protocole de simulation du transport sur chantier	9
2.1.3.3	Protocole d'échantillonnage.....	10
2.1.4	<i>Essais</i>	<i>10</i>
2.1.4.1	Essais à l'état frais	10
2.1.4.2	Essais à l'état durci	11
2.2	RESULTATS	12
2.2.1	<i>Résultats de l'ouvrabilité et de la masse volumique</i>	<i>12</i>
2.2.2	<i>Evolution des caractéristiques rhéologiques</i>	<i>14</i>
2.2.2.1	Remarques préliminaires.....	14
2.2.2.2	Evolution du couple en fonction de la vitesse dans le temps pour un taux de saturation donné.....	15
2.2.2.3	Evolution du couple en fonction de la vitesse par rapport au taux de saturation des granulats recyclés et pour une échéance de mesure donnée	16
2.2.3	<i>Résistance mécanique</i>	<i>20</i>
2.3	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	21
3	PHASE 2 : ETUDES COMPLEMENTAIRES SUR LE BETON C25/30 30R-0R	23
3.1	FORMULATIONS	23
3.2	RESULTATS DE L'OUVRABILITE ET DE LA MASSE VOLUMIQUE.....	24
3.3	EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES.....	25
3.3.1	<i>Vérification de la répétabilité de l'état hydrique à 0,87Ab</i>	<i>25</i>
3.3.2	<i>Evolution du couple en fonction de la vitesse dans le temps pour un taux de saturation donné....</i>	<i>27</i>
3.3.3	<i>Evolution du couple en fonction de la vitesse par rapport au taux de saturation des granulats recyclés et pour une échéance de mesure donnée</i>	<i>27</i>
3.4	RESISTANCE MECANIQUE.....	29
4	CONCLUSIONS GENERALES	31
5	ANNEXES	33
5.1	DONNEES PRINCIPALES DES CONSTITUANTS.....	33
5.2	RECAPITULATIF DES COEFFICIENTS C0 (COUPLE SEUIL DYNAMIQUE) ET K (PROPRIETE VISQUEUSE) OBTENUS POUR LES DIFFERENTS BETONS TESTES	37
5.3	EVOLUTION DU COUPLE EN FONCTION DE LA VITESSE DANS LE TEMPS POUR UN TAUX DE SATURATION DONNE	38
5.4	VALEURS (MOYENNE ET ECART-TYPE) SUR LES RESISTANCES MECANIQUES A LA COMPRESSION MESUREES A 28 JOURS...	42

1 Introduction

Ce rapport final synthétise l'ensemble des résultats obtenus au LMDC (INSA/UPS, Toulouse) sur le comportement à l'état frais de bétons incorporant des granulats recyclés en substitution aux granulats naturels, dans le cadre du Projet National RECYBETON. L'objectif principal est d'étudier l'évolution de la rhéologie dans le temps en fonction du taux de substitution et de l'état hydrique des sables et gravillons recyclés au moment du malaxage. La variation des paramètres d'étude est également quantifiée par la mesure de la résistance mécanique à 28 jours.

Le rapport se structure selon les deux phases de travail menées :

- phase 1, entre novembre 2013 et avril 2014,
- phase 2, entre juillet 2014 et octobre 2014.

Pour la phase 1, le rapport décrit d'abord le protocole expérimental (matériaux, formulation, mise en œuvre, essais réalisés), puis présente les résultats obtenus. Il apporte enfin les premières conclusions et les actions à mener pour compléter et finaliser l'étude, suite à une réunion téléphonique avec les partenaires (juillet 2014). Pour la phase 2, les formulations étudiées et les résultats associés sont présentés, en respectant le même protocole expérimental que celui appliqué lors de la phase 1. Une conclusion générale vient résumer l'ensemble des résultats obtenus sur les deux phases de travail.

2 Phase 1

2.1 *Protocole expérimental*

2.1.1 Constituants de base

2.1.1.1 Ciment

Le ciment CEM II/A-L 42.5 (Holcim, Rochefort) est utilisé. Les données essentielles (fournisseur) sont disponibles en annexe 1 (§ 5.1).

2.1.1.2 Filler

Le filler calcaire Betocarb HP-OG (Omya, Orgon) est utilisé. Les données principales (fournisseur) sont disponibles en annexe 1 (§ 5.1).

2.1.1.3 Adjuvant

Le superplastifiant MC PowerFlow 3140 (MC Chimie) et le retardateur de prise Centrament Retard 370 (MC Chimie) sont utilisés. Les données principales (extraits des fiches techniques fournisseur) de ces deux adjuvants sont présentées en annexe 1 (§ 5.1).

2.1.1.4 Granulats

a) Granulats naturels (GN)

Les granulats naturels utilisés sont :

- un sable semi-concassé lavé 0/4mm (Lafarge, Sandrancourt),
- des gravillons calcaires concassés de coupures 4/10mm et 6,3/20mm (Lafarge, Givet).

Les propriétés principales des granulats naturels sont données dans le Tableau 1. Quelques caractéristiques complémentaires sont fournies en annexe 1 (§ 5.1).

Tableau 1 - Caractéristiques des granulats naturels (GN)

Matériau	MV (kg/m ³)	Abs(%)	LA(%)	MDE(%)
Sable naturel 0/4	2580	0,80 ^(*)		
Gravillon naturel 4/10	2710	0,51 ^(*)		
Gravillon naturel 6,3/20	2710	0,46 ^(*)	16	17

^(*)Mesures IFSTTAR

b) Granulats recyclés

Les granulats recyclés proviennent de la plateforme de production DLB située à Gonesse. Trois coupures (0/4mm; 4/10mm et 10/20mm) sont utilisées. Les propriétés principales des granulats recyclés sont données dans le Tableau 2. Les coefficients d'absorption qui sont consignés dans le Tableau 2 sont ceux mesurés selon la norme NF EN 1097-6 après 24 heures. Ils ont été mesurés au LMDC afin d'être le plus représentatif possible des échantillons reçus. On constate que les valeurs obtenues sur les recyclés (Tableau 2) sont bien comprises dans l'intervalle des valeurs mesurées par les autres laboratoires partenaires à partir du même protocole (absorption à 24h à partir de NF EN 1097-6) (Tableau 3).

Tableau 2 - Caractéristiques des granulats recyclés (GR)

Matériau	MV (kg/m ³)	Abs(%)	LA(%)	MDE(%)
Sable recyclé 0/4	2180	9,20		
Gravillon recyclé 4/10	2290	5,21		
Gravillon recyclé 10/20	2260	5,14	37	23

Tableau 3 - Coefficients d'absorption à 24 heures (NF EN 1097) mesurés sur les granulats recyclés par différents laboratoires dans le cadre du PN RECYBETON

Matériau	EUROVIA	IFSTTAR	CTG	GEM	CEMEX	SIGMA BETON	CERGY
0/4		8,9	9,8		8,34	6,8	
4/10	5,6	5,6	5,6	5,3	5,4	5,0	6,2
10/20	5,6	5,8	5,4	4,9	5,3	5,0	5,8

2.1.2 Matériaux – Bétons

2.1.2.1 Pré-humidification des granulats

Avant la phase de pré-humidification, la teneur en eau des granulats est mesurée. Celle-ci varie en effet en fonction des variations de température et d'humidité relative ambiantes et en fonction de la zone de prélèvement dans le big bag (haut, milieu, fond). Il est donc essentiel de quarter les coupures granulaires pour obtenir un échantillon homogène avant chaque malaxage. Pour chaque type de granulat, deux échantillons quartés sont utilisés pour déterminer une teneur en eau moyenne. A partir de la teneur en eau initiale représentative de chaque coupure homogénéisée, la quantité d'eau nécessaire est calculée afin de pré-humidifier les granulats à l'état hydrique visé (cf. § 2.1.2.2).

La procédure de pré-humidification est la suivante :

- mise en bidon étanche d'une certaine quantité de granulat ; par mesure de précaution, des sacs plastiques sont placés dans le bidon afin d'éviter toute perte d'eau pouvant être causée par l'absorption en paroi ;
- ajustement, 24h avant le coulage, de la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la teneur en eau visée ;
- homogénéisation de la teneur en eau des granulats par mise en rotation du bidon placé à l'horizontale.

2.1.2.2 Formulations

A ce stade, l'impact de l'incorporation de matériau de recyclage dans la phase granulaire a été étudié sur trois compositions de béton établies par T. Sedran¹, dans la classe de résistance C25/30:

- un béton, noté OR-OR, n'incorporant que les granulats naturels ;
- un béton, noté OR-100R, dont la totalité des gravillons naturels est remplacée par les gravillons recyclés ;
- un béton, noté 30R-OR, dont 30% massique du sable naturel est remplacé par le sable recyclé.

¹T. Sedran, Mise au point des formules de béton de référence ; Thème 0, version du 01/07/13.

Les états hydriques étudiés ont été choisis après discussion avec les partenaires du PN (réunion téléphonique du 18/10/2013).

Quel que soit le béton, l'état hydrique des granulats naturels (sable et gravillons) a toujours été maintenu à 100% de leur coefficient d'absorption.

Les états hydriques des granulats recyclés testés sont les suivants :

- Béton OR-100R
 - le coefficient d'absorption plus 1%, soit 120% du coefficient d'absorption, $Ab+1\%$
 - 75% du coefficient d'absorption ($0,75Ab$),
 - 30% du coefficient d'absorption ($0,30Ab$).

- Béton 30R-OR
 - 120% du coefficient d'absorption ($1,2Ab$)
 - 87,0% du coefficient d'absorption ($0,87Ab$)
 - 33% du coefficient d'absorption ($0,33Ab$).

A noter qu'un séchage à 80°C des recyclés a été nécessaire lorsque leur teneur en eau initiale était supérieure aux états hydriques visés. Cette action a été nécessaire pour atteindre $0,3Ab$ (gravillon) et $0,33Ab$ (sable). Dans les autres cas, c'est l'ajout d'une quantité d'eau supplémentaire qui a été nécessaire pour atteindre les états hydriques visés.

Les compositions complètes sont données dans le Tableau 4.

Sachant que les formulations ont été déterminées théoriquement par T. Sedran à partir du logiciel BétonLab Pro3, le dosage en superplastifiant SP a été ajusté sur une gâchée initiale du béton OR-OR et OR-100R ($Ab+1\%$) afin d'atteindre la limite haute de la classe de consistance S4 (21 cm). Après cet ajustement, le matériau est caractérisé à l'état frais (affaissement au cône d'Abrams, masse volumique apparente, cisaillement par agitation de proximité).

Tableau 4 - Formulations des bétons

Formulations		OR-OR	OR – 100R			30R – OR		
			Ab+1%	75%Ab	30%Ab	120%Ab	87%Ab	33%Ab
Constituants (kg/m ³)	Eau d'ajout	178,6	184,4	204,2	224,2	178,0	185,0	196,8
	Eau absorbée	11,4	59,6	39,8	19,8	35,0	28,0	16,2
	Ciment	270	282	282	282	276	276	276
	Filler calcaire	45	31	31	31	31	31	31
	0/4 Na	780	806	806	806	549	549	549
	0/4 Re					235	235	235
	4/10 Na	267				190	190	190
	4/10 Re		163	163	163			
	6.3/20 Na	820				829	829	829
	10/20 Re		701	701	701			
	SP initial	1,31	1,4	1,4	1,4	1,16	1,16	1,16
	SP rajouté	0,49	0,1					
Retardateur					1,1	1,1	1,1	

La quantité d'eau totale (eau d'ajout + eau absorbée par les granulats) est constante pour chaque type de formulation (Réf, OR-100R, 30R-OR).

2.1.3 Malaxage –Échantillonnage

2.1.3.1 Protocole de malaxage

Un malaxeur COLLOMIX de type XM 2 – 650 d'une capacité de 25 litres (Figure 1) est utilisé pour la phase de confection. La séquence de malaxage suivante a été systématiquement appliquée :

- introduction des gravillons, de la moitié du sable, du ciment et du filler calcaire et enfin de la seconde moitié du sable ; malaxage durant 1 minute ;
- introduction de l'eau avec le ou les adjuvants durant 30 secondes ;
- poursuite du malaxage durant 3 minutes et 30 secondes.

La durée totale du malaxage est de 5 minutes. La fin du malaxage est prise comme référence T_0 des essais.

Pour chaque composition et un état hydrique, deux gâchées sont coulées, l'une pour la caractérisation à T_0 , l'autre pour le suivi des caractéristiques dans le temps (T_0+45' et T_0+90').



Figure 1 - Malaxeur COLLOMIX XM 2 - 650

2.1.3.2 Protocole de simulation du transport sur chantier

Les échéances T_0+45' et T_0+90' permettent de simuler le transport du béton par camion-toupie jusqu'au chantier. Pour ce faire, immédiatement après le malaxage, le béton est versé dans une bétonnière équipée d'un variateur de fréquence (Figure 2). L'ouverture de la bétonnière est ensuite étanchéifiée afin d'éviter l'évaporation avec l'ambiance.

Le béton est alors agité à vitesse lente (3 tours/minute) jusqu'à l'échéance fixée moins 2 minutes. Ensuite, durant 2 minutes et jusqu'à l'échéance de test (T_0+45' et T_0+90'), le mélange est agité avec une vitesse plus rapide (12 tours/ minute) pour simuler la décharge à la livraison.



Figure 2 - Bétonnière équipée de variateur de fréquence

2.1.3.3 Protocole d'échantillonnage

Pour chaque échéance, (T_0 , T_0+45' et T_0+90'), le béton est mis en place en 2 couches dans des moules cylindriques en carton de dimension $\varnothing 11\text{cm} \times H22\text{ cm}$, et soumis à un serrage de 10 secondes par couche à la table vibrante. Ce mode de serrage n'est pas préconisé par la norme NF EN 12390-2, NA.7 5.2.1 (piquage à raison de 25 coups par couche pour un affaissement supérieur ou égal à 100 mm et un E/C supérieur ou égal à 0, 50) mais, appliqué à tous les bétons testés, il permet une comparaison objective des résultats de résistance à la compression obtenus dans le cadre de ce programme expérimental.

Le démoulage intervient 24 heures après la phase de coulage. Les éprouvettes sont ensuite conservées en salle humide ($20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $95\% \pm 5\% \text{ HR}$) jusqu'à l'échéance d'essai (28 jours).

2.1.4 Essais

2.1.4.1 Essais à l'état frais

L'affaissement est mesuré au cône d'Abrams, selon la norme NF EN 12350-2, aux échéances de T_0 , T_0+45' , et T_0+90' . D'autre part, la masse volumique apparente à T_0 est mesurée selon la norme NF EN 12350-6.

L'évolution des caractéristiques rhéologiques dans le temps à T_0 , T_0+45' et T_0+90' est suivie par l'essai au rhéomètre (RhéoCAD, Figure 3.b).

La procédure expérimentale est décrite maintenant. Le mélange est placé dans un bol de 5 litres (18cm de diamètre) (Figure 3.a) ; avant la mesure, un serrage par vibration est assuré durant 4 secondes sur une seule couche de matériau. Les mesures sont faites sous vibration (table vibrante 50Hz, 1g). Le mobile de cisaillement est à 4 ailettes (10cm de diamètre et 10cm de hauteur).



a.



b.

Figure 3 - Rhéomètre RhéoCAD

L'évolution du couple moyen en fonction de la vitesse moyenne de cisaillement en régime d'écoulement pseudo-permanent est déterminée à partir de l'historique de cisaillement présenté sur la Figure 4. La vitesse imposée au mobile est rapidement augmentée de 5tr/min jusqu'à 30tr/min sur une dizaine de secondes afin de déstructurer le matériau. La vitesse est ensuite diminuée par palier, depuis 30 tr/min jusqu'à 5 tr/min. Le changement de palier est effectué lorsque le régime d'écoulement est quasi-permanent, ce qui correspond à une faible variation du couple.

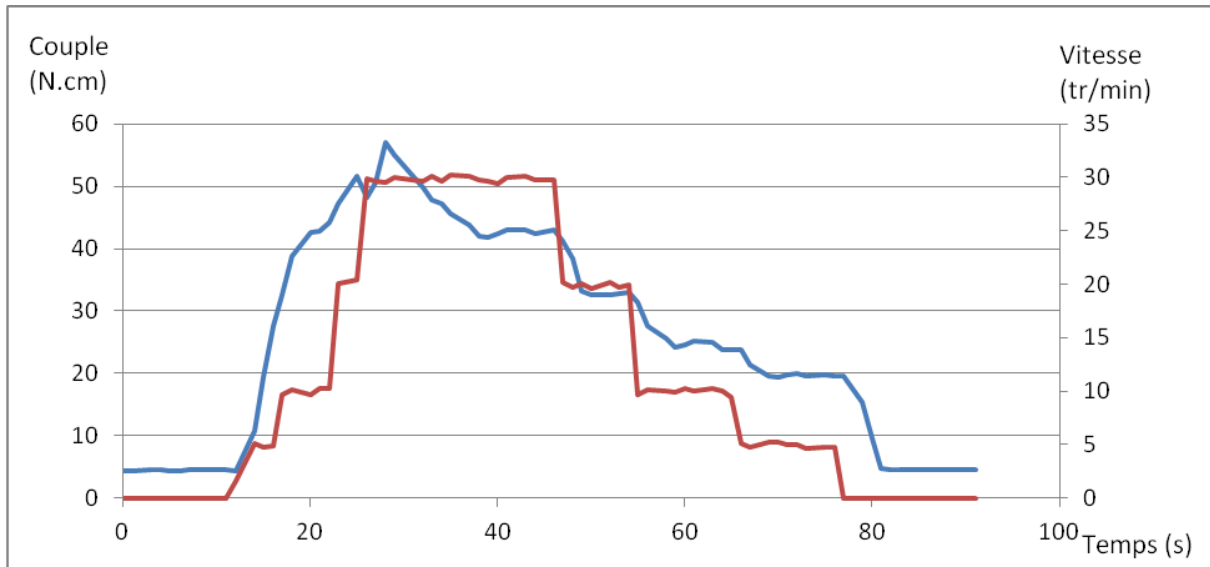


Figure 4 - Historique typique du cisaillement (vitesse en rouge, couple en bleu)

2.1.4.2 Essais à l'état durci

La résistance à la compression est mesurée à 28 jours suivant le protocole normatif NF EN 12390-3. La vitesse de chargement est de 0,5 MPa/s jusqu'à la rupture. La charge appliquée est assurée par une presse hydraulique de 4000kN contrôlée en force et conforme à la norme NF P18-411 (Figure 6). L'essai est réalisé sur les éprouvettes cylindriques $\varnothing 11$ cm x H22 cm rectifiées (Figure 5). Les résistances en compression présentées dans ce rapport sont la moyenne de 3 résultats.



Figure 5 - Rectifieuse



Figure 6- Presse 400 tonnes

2.2 Résultats

2.2.1 Résultats de l'ouvrabilité et de la masse volumique

Le Tableau 5 présente les résultats d'affaissement ainsi que les masses volumiques apparentes.

Tableau 5 - Récapitulatif des résultats d'affaissement et de masse volumique

Formulations		OR-OR	OR-100R			30R-OR		
			Ab+1 %	75%Ab	30%A b	120%A b	87%Ab	33%Ab
Affaissement (cm)	T ₀	21	21	22	22	21	21	21
	T ₀₊₄₅	13	13	17	17	17	19	19
	T ₀₊₉₀	9	10	11	14	12	18	17
Masse volumique (kg/m ³)		2410	2216	2252	2230	2340	2302	2314

Valeurs d'affaissement arrondies à 1cm près, conformément à la norme NF EN 12350-2

La Figure 7 présente l'évolution de l'affaissement dans le temps pour l'ensemble des bétons testés.

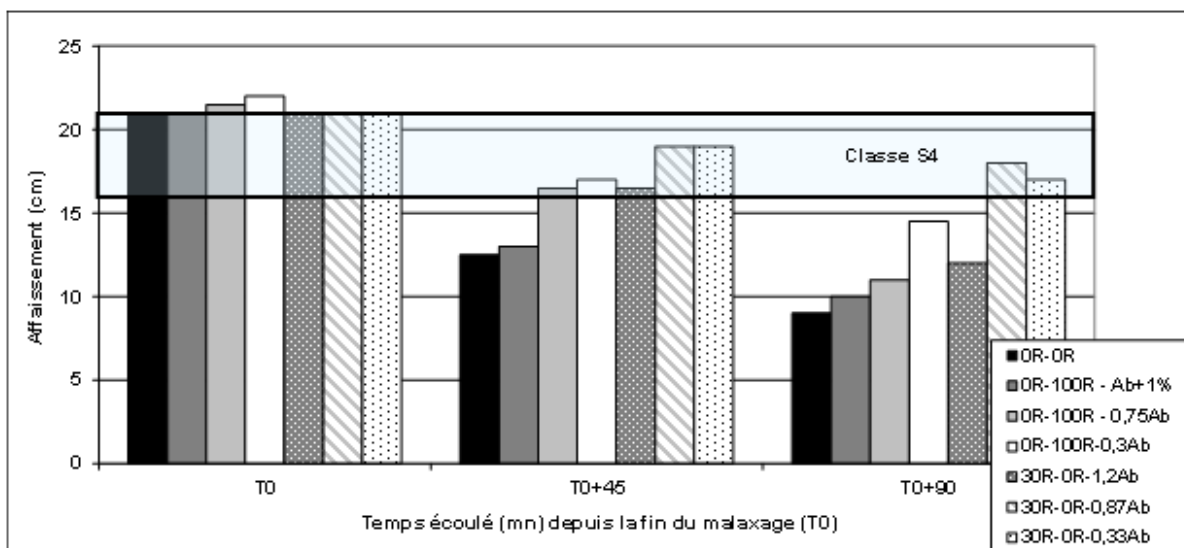


Figure 7 - Evolution de l'affaissement dans le temps

A partir de cette figure, on retient les points suivants.

- Les affaissements sont quasiment identiques à T_0 (21cm à 22cm) et légèrement supérieurs à celui visé (20cm) par T. Sedran lors de la mise en point des formules ;
- Des valeurs identiques pour une formule donnée et quel que soit l'état hydrique des recyclés peuvent paraître surprenantes à T_0 car seule l'eau inter-grains disponible initialement varie avec l'état hydrique (l'eau totale est maintenue constante pour une composition donnée) ; l'eau inter-grains en plus grande quantité dans le béton OR-100R lorsque les gravillons recyclés sont en deçà de la saturation a d'ailleurs permis d'éviter le surdosage en superplastifiant.

Des hypothèses explicatives peuvent être avancées à ce stade au sujet de l'absence de variation de l'affaissement à T_0 :

Cinétique d'absorption des recyclés -Le malaxage dure cinq minutes, dont 4 minutes de contact effectif entre les recyclés et l'eau d'apport. Les résultats obtenus par Laneyrie et al². au LM2GC de Cergy-Pontoise montrent que l'absorption dans les 5 premières minutes atteint 85% de l'absorption à 24h pour les gravillons recyclés, plus de 85% pour le sable recyclé ; il serait trop simple de conclure à un nivellement de l'ouvrabilité à T_0 sur la base de la confrontation de la durée de malaxage avec la cinétique d'absorption des recyclés. De plus, l'absorption directe caractérisée sur les recyclés préalablement séchés n'est vraisemblablement pas transposable à une absorption dans le béton en considérant aussi l'état hydrique initial des recyclés au moment du malaxage.

Etat hydrique initial des recyclés au moment du malaxage - La cinétique d'absorption va forcément varier dans le béton frais en fonction de ce paramètre puisque l'imbibition ne concernera pas les mêmes tailles de pores.

Cause chimique - L'eau de pré-saturation étant en contact 24 heures avant le malaxage, la dissolution du calcium n'est pas à exclure et pourrait entraîner une modification de l'absorption. Cette hypothèse amène à penser, à ce stade des études, que des essais de caractérisation de l'absorption des recyclés avec de l'eau de chaux, voire eau de chaux +alcalins seraient pertinents.

- Une perte significative de l'affaissement est observée pour le béton OR-OR.
- Une perte d'affaissement d'autant moins importante est constatée que les gravillons recyclés sont dans un état hydrique d'autant plus en-deçà de la saturation (OR-100R).
- Les mêmes observations que précédemment sont à faire lorsque 30% de la masse de sable naturel a été remplacé par la même masse de sable recyclé : le maintien de l'ouvrabilité est

² C. Laneyrie, A.L. Beaucour, A. Noumowé, Évaluation des méthodes de caractérisation des granulats naturels appliquées aux recyclés : mesures de masses volumiques et d'absorption d'eau, thème 2, axe A.

meilleur lorsque l'état hydrique du sable recyclé est inférieur ou égal à sa saturation ; on note même le maintien de la classe dans le temps, vraisemblablement favorisé par la présence du retardateur dans les compositions 30R-0R.

- La masse volumique apparente est diminuée dès lors que des granulats recyclés (sable ou gravillons) moins denses que les granulats naturels sont incorporés. En revanche, on ne note pas une évolution particulière en fonction de l'état hydrique des recyclés.

2.2.2 Evolution des caractéristiques rhéologiques

2.2.2.1 Remarques préliminaires

1) Les résultats obtenus montrent que la relation couple moyen C – vitesse moyenne ω peut être admise comme linéaire pour l'ensemble des bétons testés, de la forme $C = C_0 + K\omega$, avec

- C_0 (ordonnée à l'origine), couple seuil dynamique ;
- K , la pente qui traduit une propriété visqueuse dépendant de la géométrie de cisaillement utilisée. Le paramètre K ne doit donc pas être considéré comme une viscosité plastique intrinsèque au matériau. Néanmoins la comparaison de cette pente entre l'ensemble des bétons permet d'apprécier une variation de viscosité.

Les paramètres C_0 et K sont déterminés par régression aux moindres carrés et sont donnés systématiquement à côté des figures qui présentent les évolutions couple/vitesse. Ils sont également regroupés en annexe 2 (§ 5.2).

2) A supposer que le couple seuil C_0 a une signification physique (il n'est qu'une extrapolation à une vitesse de rotation nulle des mesures faites entre 5tr/min et 30tr/min), on peut le représenter en fonction de l'affaissement (Figure 8). Le nuage de points qui rend compte de toutes les formulations testées montre une évolution logique quelle que soit l'échéance d'essai. De plus en reportant un fuseau de dispersion maximale pour ce nuage, on ne note pas une dispersion plus marquée à la première échéance T_0 ($6\text{N.cm} < C_0 < 17\text{N.cm}$) qu'aux autres échéances.

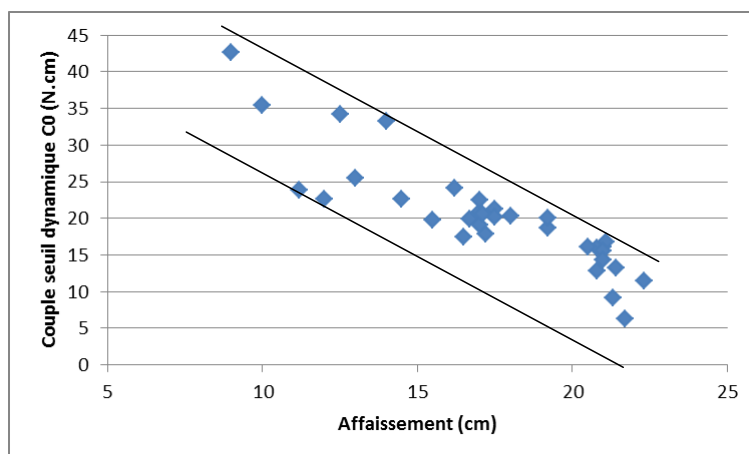


Figure 8 - Evolution du paramètre couple seuil dynamique C0 en fonction de l'affaissement

3) Dans le domaine testé de vitesses de rotation imposées au mobile de cisaillement, les évolutions couple/vitesse permettent de comparer l'aptitude à l'écoulement des bétons. Ainsi, on dira, d'un béton à l'autre, que l'aptitude à l'écoulement est moins bonne lorsque les couples résistants obtenus aux différentes vitesses testées sont plus élevés, même à pente K identique.

4) Des études de répétabilité sur mortiers et bétons vibrés montrent que le couple moyen issu de la mesure en écoulement est connu avec une précision moyenne de 4%.

2.2.2.2 Evolution du couple en fonction de la vitesse dans le temps pour un taux de saturation donné

Afin d'analyser l'effet du temps sur l'évolution de la rhéologie, les courbes {couple-vitesse} sont représentées aux échéances T_0 ; T_0+45' et T_0+90' pour une composition donnée et un état hydrique donné des granulats. La Figure 9, relative au béton OR-OR, illustre typiquement les évolutions observées quels que soient l'état hydrique et la composition (remplacement des gravillons naturels ou du sable naturel par des gravillons recyclés ou du sable recyclé, respectivement, cf. annexe 3, § 5.3). L'altération des propriétés d'écoulement avec l'âge du matériau est essentiellement due aux phénomènes irréversibles de l'hydratation, même après une agitation continue entre les échéances d'essai.

A ce stade, on conclut qu'il existe toujours une altération de l'écoulement dans le temps ce, quel que soit l'état hydrique des granulats recyclés

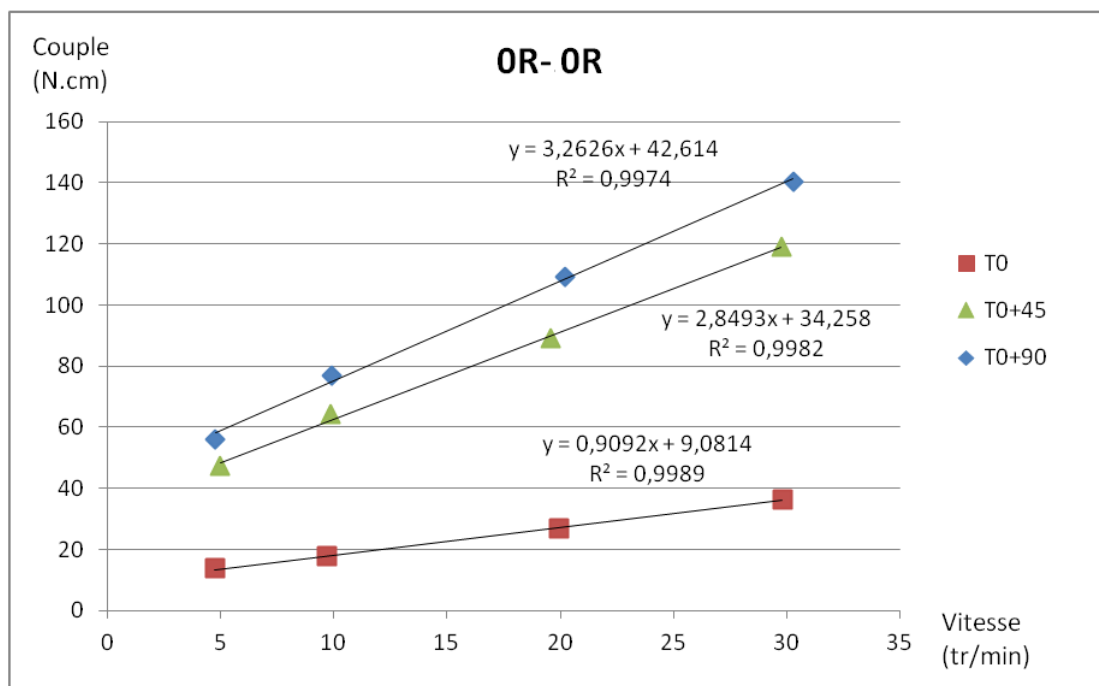


Figure 9 - Evolution du couple en fonction de la vitesse à T₀, T₀+45 et T₀+90 pour le Béton OR-OR

2.2.2.3 Evolution du couple en fonction de la vitesse par rapport au taux de saturation des granulats recyclés et pour une échéance de mesure donnée

Dans les Figures 10 à 15, les résultats obtenus sur la formule OR-OR ont été systématiquement reportés. La formule OR-OR doit être vue comme un repère à partir duquel on peut juger de l'aptitude à l'écoulement des formules incorporant les recyclés (OR-100R, §a ; 30R-OR, §b).

a) Formule OR-100R

Les Figures 10 à 12 présentent chacune à une échéance donnée l'évolution du couple en fonction de la vitesse pour les 3 états hydriques étudiés des gravillons recyclés.

On note que :

- par comparaison à OR-OR, l'aptitude à l'écoulement peut être altérée à T₀ par l'incorporation de gravillons recyclés lorsque leur état hydrique est loin (en-deçà ou au-delà) du coefficient d'absorption ; l'état au-delà du coefficient d'absorption (Ab+1%) est le plus préjudiciable (Figure 10);
- par comparaison à OR-OR, l'aptitude à l'écoulement est comparable ou améliorée avec l'incorporation de gravillons recyclés à T₀+45' et T₀ +90'; l'état hydrique proche du coefficient d'absorption est encore celui qui confère au béton le meilleur écoulement (Figure 11 et 12) ;
- lorsque l'état hydrique des gravillons recyclés est en-deçà de la valeur du coefficient d'absorption, l'altération de la viscosité (pente K) est la plus prononcée entre 45 minutes et 90 minutes après la fin du malaxage.

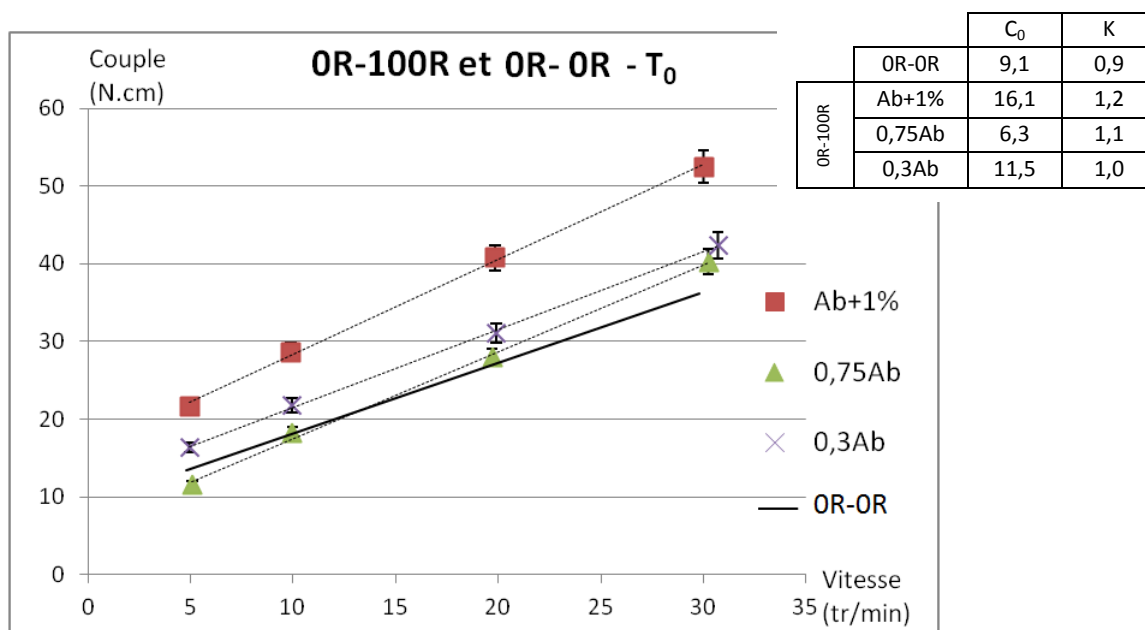


Figure 10- Evolution du couple en fonction de la vitesse à T0 pour les bétons OR-100R et OR-OR

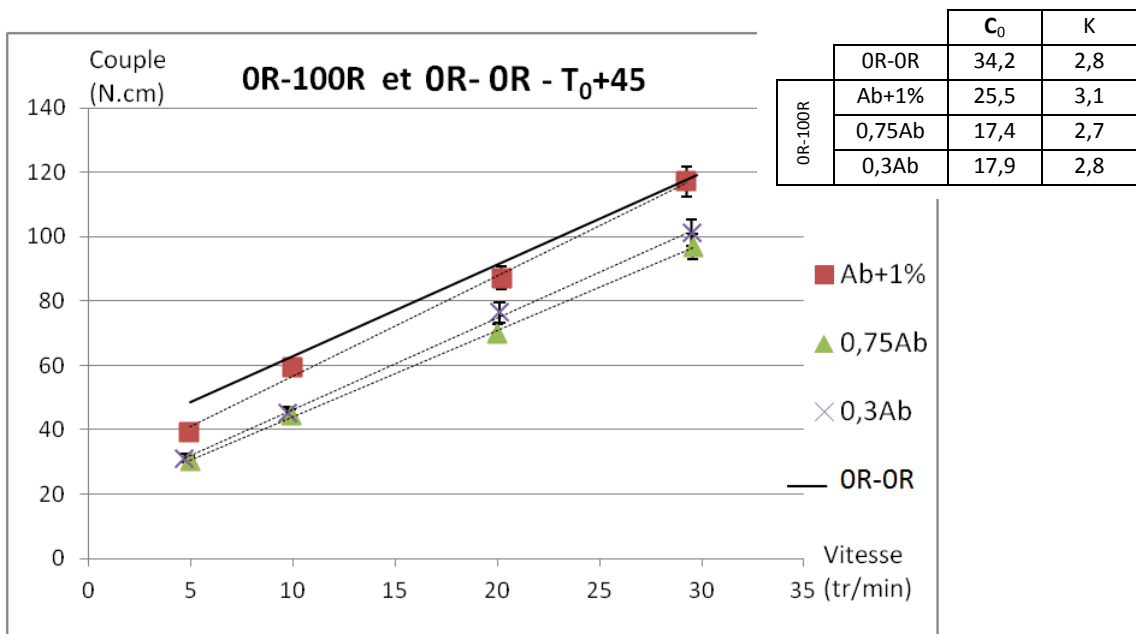


Figure 11 - Evolution du couple en fonction de la vitesse à T₀+45' pour les bétons OR-100R et OR-OR

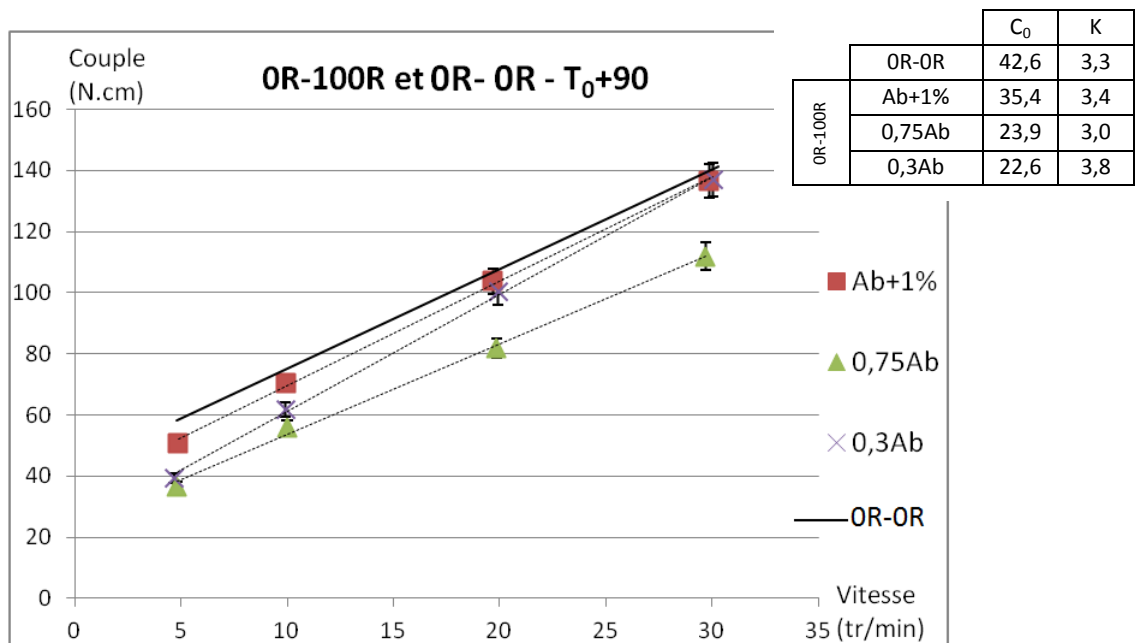


Figure 12 - Evolution du couple en fonction de la vitesse à T₀+90' pour les bétons OR-100R et OR-OR

b) Formule 30R-OR

Les Figures 13 à 15 présentent chacune à une échéance donnée l'évolution du couple en fonction de la vitesse pour les 3 états hydriques étudiés du sable recyclé.

On note que :

- par comparaison à OR-OR, l'aptitude à l'écoulement est altérée à T_0 par l'incorporation de sable recyclé ; l'altération est la plus prononcée lorsque l'état hydrique du sable est au-delà du coefficient d'absorption (1,2Ab) (Figure 13);
- par comparaison à OR-OR, l'aptitude à l'écoulement est améliorée avec l'incorporation de sable recyclé à T_0+45' et $T_0 +90'$; comme déjà observé sur le béton OR-100R, l'état hydrique proche du coefficient d'absorption est celui qui confère au béton le meilleur écoulement (Figures 14 et 15) ;
- comme déjà observé sur le béton OR-100R, l'état hydrique en-deçà de la valeur du coefficient d'absorption entraîne une augmentation significative de la viscosité (pente K) entre 45 minutes et 90 minutes après la fin du malaxage.

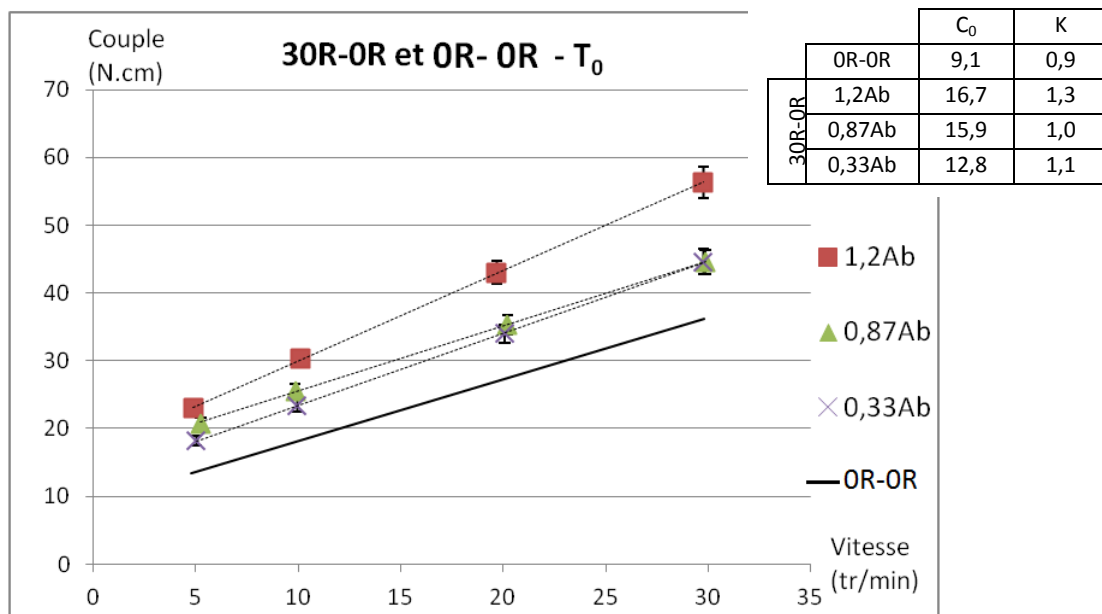


Figure 13 - Evolution du couple en fonction de la vitesse à T_0
Béton 30R-OR et béton OR-OR

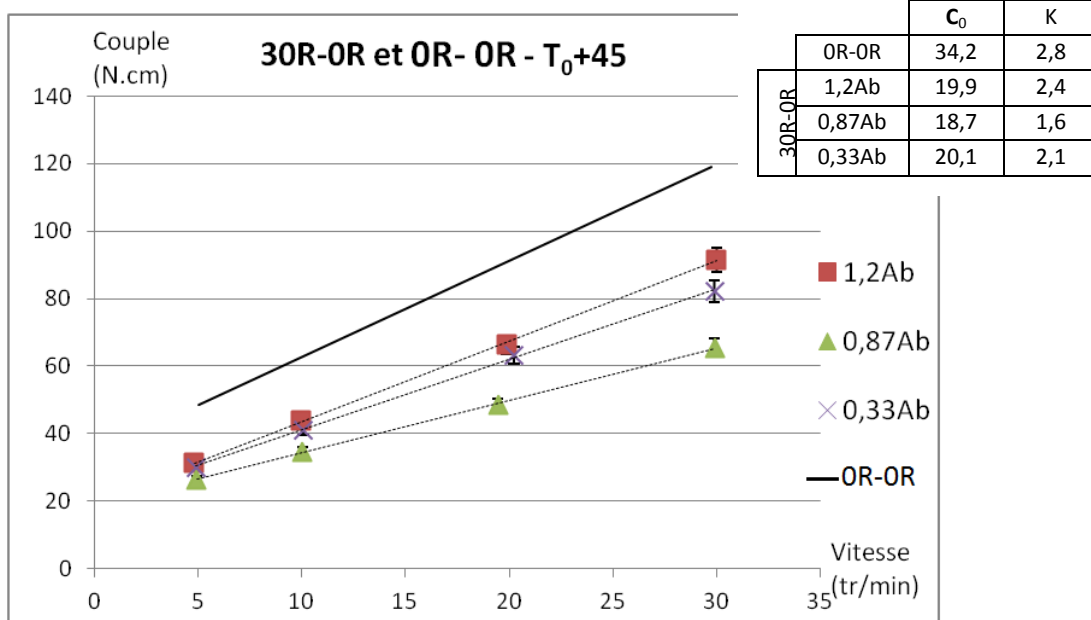


Figure 14 - Evolution du couple en fonction de la vitesse à T₀+45'
Béton 30R-OR et béton OR-OR

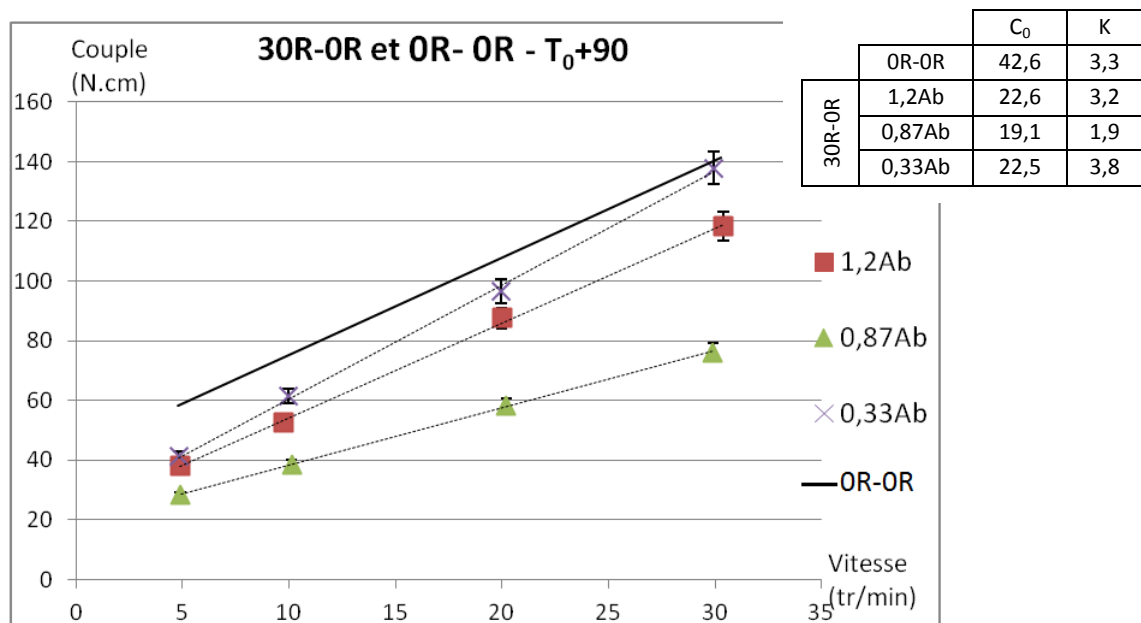


Figure 15 - Evolution du couple en fonction de la vitesse à T₀+90'
Béton 30R-OR et béton OR-OR

2.2.3 Résistance mécanique

Les Figures 16 et 17 présentent l'évolution de la résistance à la compression à 28 jours (moyenne, valeurs minimale et maximale relevées à partir de trois mesures indépendantes pour chaque béton) en fonction de l'état hydrique des granulats recyclés et de l'échéance de réalisation des éprouvettes, respectivement pour les bétons OR-100R et les bétons 3OR-OR. Sur chaque figure, le béton OR-OR est reporté afin de mieux mettre en évidence l'effet de l'incorporation des granulats recyclés sur les résistances.

L'ensemble des valeurs (moyenne et écart-type) est synthétisé en annexe 4 (§ 5.4).

Au sens de la norme EN 206-1, en se plaçant dans le cas d'une production initiale, les bornes $f_{ck, cyl} + 4$ et $f_{ck, cyl} - 4$ sont également reportées sur les figures en considérant la classe de résistance C25/30 et $f_{ck, cyl} = 25\text{MPa}$ (résistance caractéristique).

On note que si la condition $f_{ci} \geq f_{ck, cyl} - 4$ est systématiquement vérifiée (f_{ci} [MPa] = résultat individuel minimal parmi les trois éprouvettes testées pour chaque béton), la condition $f_{cm} \geq f_{ck, cyl} + 4$ ne l'est pas toujours (f_{cm} [MPa] = résistance moyenne obtenue pour chaque béton).

- La substitution complète de gravillons recyclés aux gravillons naturels (bétons OR-100R) entraîne toujours la dégradation de la classe C25/30 ; cette dégradation est très marquée lorsque l'état hydrique des gravillons est en-deçà du coefficient d'absorption, quelle que soit l'échéance à laquelle les éprouvettes ont été confectionnées (Figure 16) ;
- La substitution de 30% massique de sable naturel avec du sable recyclé entraîne essentiellement une dégradation de la classe de résistance lorsque l'état hydrique du sable recyclé est le plus proche du coefficient d'absorption, quelle que soit l'échéance à laquelle les éprouvettes ont été confectionnées (Figure 17).

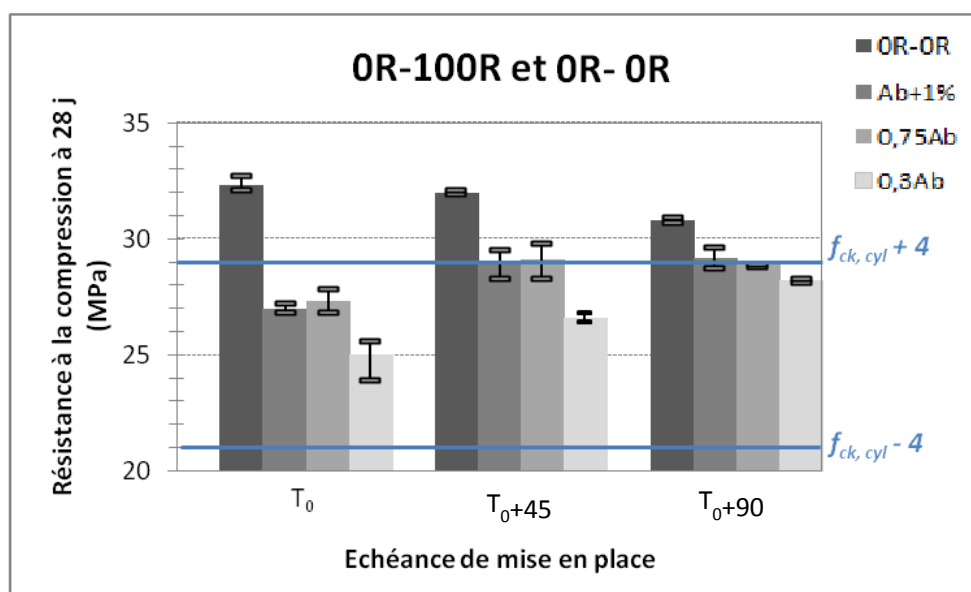


Figure 16 - Résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'état hydrique des gravillons recyclés et de l'échéance de mise en place – bétons OR-100R et béton OR-OR

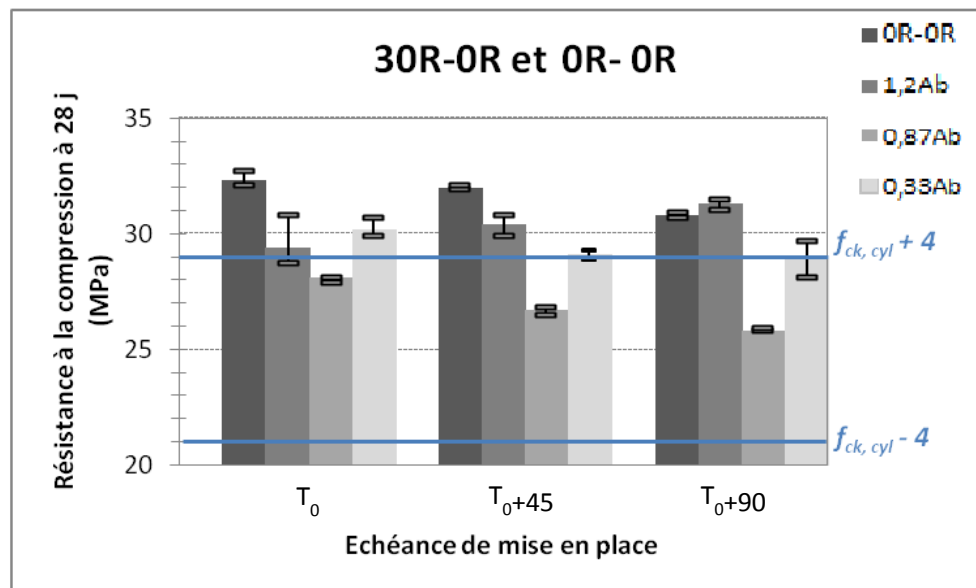


Figure 17 - Résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'état hydrique des gravillons recyclés et de l'échéance de mise en place – bétons 30R-OR et béton OR-OR

2.3 Conclusions et perspectives

Lors de la première phase de travail, les résultats suivants peuvent être retenus :

- l'affaissement initial (T_0) varie peu ou pas pour une composition donnée malgré la variation de l'eau inter-grains avec l'état hydrique des recyclés (eau totale maintenue constante pour chaque composition étudiée) ; à ce stade, il serait souhaitable d'étudier la cinétique d'absorption des recyclés en fonction d'un état hydrique initial plus ou moins saturé mais également d'étudier cette cinétique avec une eau proche de la solution interstitielle du béton (eau de chaux en présence ou non d'alcalins et des adjuvants chimiques) ;
- la perte d'affaissement dans le temps est d'autant moins importante que les granulats recyclés sont dans un état hydrique loin en deçà de la saturation (OR-100R et 30R-OR) ; dans ce cas, le surdosage en superplastifiant n'a pas été nécessaire pour atteindre la classe S4 (OR-100R), et on note même le maintien de la classe S4 dans le temps (30R-OR), vraisemblablement favorisé par la présence du retardateur (30R-OR) ;
- par comparaison à OR-OR, l'aptitude à l'écoulement peut être altérée à T_0 par l'incorporation de granulats recyclés lorsque leur état hydrique est loin du coefficient d'absorption ; l'état au-delà du coefficient d'absorption est le plus préjudiciable ;
- par comparaison à OR-OR, l'aptitude à l'écoulement peut être améliorée avec l'incorporation de granulats recyclés à T_0+45' et T_0+90' ; l'état hydrique proche du coefficient d'absorption est celui qui confère au béton le meilleur écoulement ;

- lorsque l'état hydrique des granulats recyclés est en-deçà de la valeur du coefficient d'absorption, l'altération de l'écoulement est prononcée entre 45 minutes et 90 minutes après la fin du malaxage ;
- la substitution complète de gravillons recyclés aux gravillons naturels (bétons OR-100R) entraîne toujours la dégradation de la classe de résistance C25/30 ; cette dégradation est très marquée lorsque l'état hydrique des gravillons est en-deçà du coefficient d'absorption, quelle que soit l'échéance à laquelle les éprouvettes ont été confectionnées;
- la substitution de 30% massique de sable naturel avec du sable recyclé (30R-OR) entraîne essentiellement une dégradation de la classe de résistance C25/30 lorsque l'état hydrique du sable recyclé est le plus proche du coefficient d'absorption, quelle que soit l'échéance à laquelle les éprouvettes ont été confectionnées.

L'évolution singulière des résistances à 28 jours lorsque le sable naturel est remplacé par le sable recyclé à hauteur du taux de 30% massique est difficilement interprétable sur la base des données acquises. Afin de confirmer ou d'infirmer les tendances obtenues, il a été décidé, en réunion téléphonique avec les partenaires (10 juillet 2014), de mener les actions suivantes :

- répéter 2 fois le béton C25/30 30R-OR lorsque l'état hydrique initial du sable recyclé correspond à 0,87Ab ;
- encadrer la valeur de 0,87Ab en réalisant 2 bétons C25/30 30R-OR, le premier dans lequel l'état hydrique initial du sable recyclé correspond à l'absorption à 24 heures (1Ab), le second dans lequel le sable recyclé est incorporé à 0,5Ab.

3 Phase 2 : études complémentaires sur le béton C25/30 30R-OR

Le protocole expérimental appliqué est strictement le même que celui utilisé lors de la phase 1 (cf. § 2.1). Les essais réalisés sont également les mêmes que ceux pratiqués en phase 1 :

- mesures d'affaissement et d'écoulement à la fin du malaxage, à 45 minutes et à 90 minutes après le malaxage en maintenant une agitation lente et continue (bétonnière) jusqu'aux échéances ;
- mesures des résistances à la compression à 28 jours pour les 3 échéances de mise en place des éprouvettes.

Les formulations répétées à 87% de Ab seront dénommées 0,87Ab1 (phase 1), 0,87Ab2 et 0,87Ab3 (gâchées répétées deux fois en phase 2)

3.1 Formulations

L'ensemble des compositions de la série C25/30 30R – OR est donné dans le Tableau 6. La formulation OR-OR n'incorporant que des granulats naturels est également rappelée dans le tableau.

Tableau 6 - Formulations des bétons

Formulations		OR-OR	30R – OR				
			1,20 Ab	1,00 Ab	0,87 Ab	0,50 Ab	0,33 Ab
Constituants (kg/m ³)	Eau d'ajout	178,6	178,0	182,0	185,0	193,0	196,8
	Eau absorbée	11,4	35,0	30,8	28,0	20,0	16,2
	Ciment	270	276	276	276	276	276
	Filler calcaire	45	31	31	31	31	31
	0/4 Na	780	549	549	549	549	549
	0/4 Re		235	235	235	235	235
	4/10 Na	267	190	190	190	190	190
	4/10 Re						
	6.3/20 Na	820	829	829	829	829	829
	10/20 Re						
	SP initial	1,31	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
	SP rajouté	0,49					
Retardateur		1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	

La quantité d'eau totale (eau d'ajout + eau absorbée par les granulats) est maintenue constante pour chaque formulation dérivée 30R-OR.

3.2 Résultats de l'ouvrabilité et de la masse volumique

Le Tableau 7 présente les résultats d'affaissement ainsi que les masses volumiques apparentes de béton 30R-OR.

La Figure 18 présente l'évolution de l'affaissement dans le temps pour le béton OR-OR et l'ensemble des bétons de la série 30R-OR. La moyenne et la dispersion sont représentées pour les bétons 0,87Ab.

Les résultats consolident les conclusions issues de la phase 1. On constate que la perte d'affaissement est marquée lorsque le sable recyclé est dans un état hydrique supérieur ou égal à celui qui correspond au coefficient d'absorption ; cette observation s'avère être prononcée à l'échéance T_0+90' , à tel point que la classe S4 n'est plus respectée. Le cas sursaturé est le plus nuisible pour l'ouvrabilité à long terme.

Tableau 7 - Récapitulatif des résultats d'affaissement et de masse volumique

Formulations		OR-OR	30R-OR						
			1,20Ab	1,00Ab	0,87Ab1	0,87Ab2	0,87Ab3	0,50Ab	0,33Ab
Affaissement (cm)	T_0	21	21	22	21	21	21	21	21
	T_{0+45}	13	17	17	19	18	18	17	19
	T_{0+90}	9	12	14	18	18	16	16	17
Masse volumique (kg/m^3)		2410	2340	2340	2302	2316	2337	2337	2314

Valeurs d'affaissement arrondies à 1 cm près, selon NF EN 12350-2

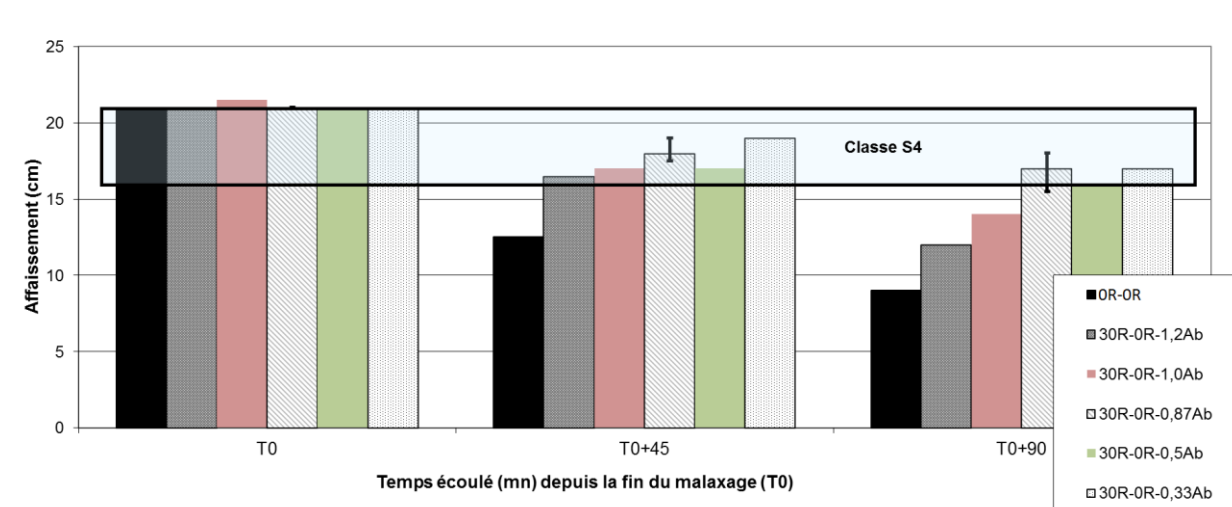


Figure 18 - Evolution de l'affaissement dans le temps

3.3 Evolution des caractéristiques rhéologiques

3.3.1 Vérification de la répétabilité de l'état hydrique à 0,87Ab

Les Figures 19 à 21 présentent pour chaque échéance donnée la comparaison de l'évolution du couple/vitesse en régime permanent d'écoulement pour les trois bétons réalisés au taux de saturation de 0,87Ab. On constate que le coefficient de variation sur le couple est inférieur ou égal à la précision de 4%, excepté à l'échéance d'essai T_0+90' pour laquelle il peut atteindre 6%. Il est ainsi confirmé la répétabilité du protocole mené au laboratoire, notamment la phase de préparation des matériaux.

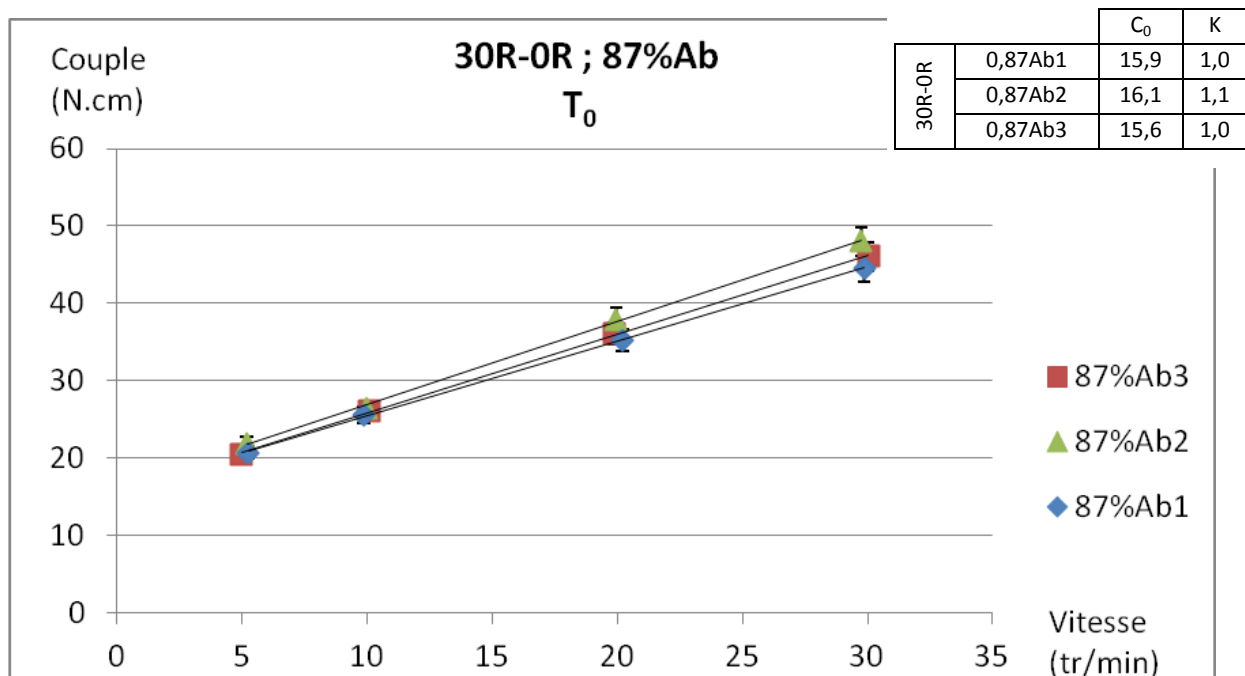


Figure 19 - Evolution du couple en fonction de la vitesse à T_0
Béton 30R-OR ; 87%Ab

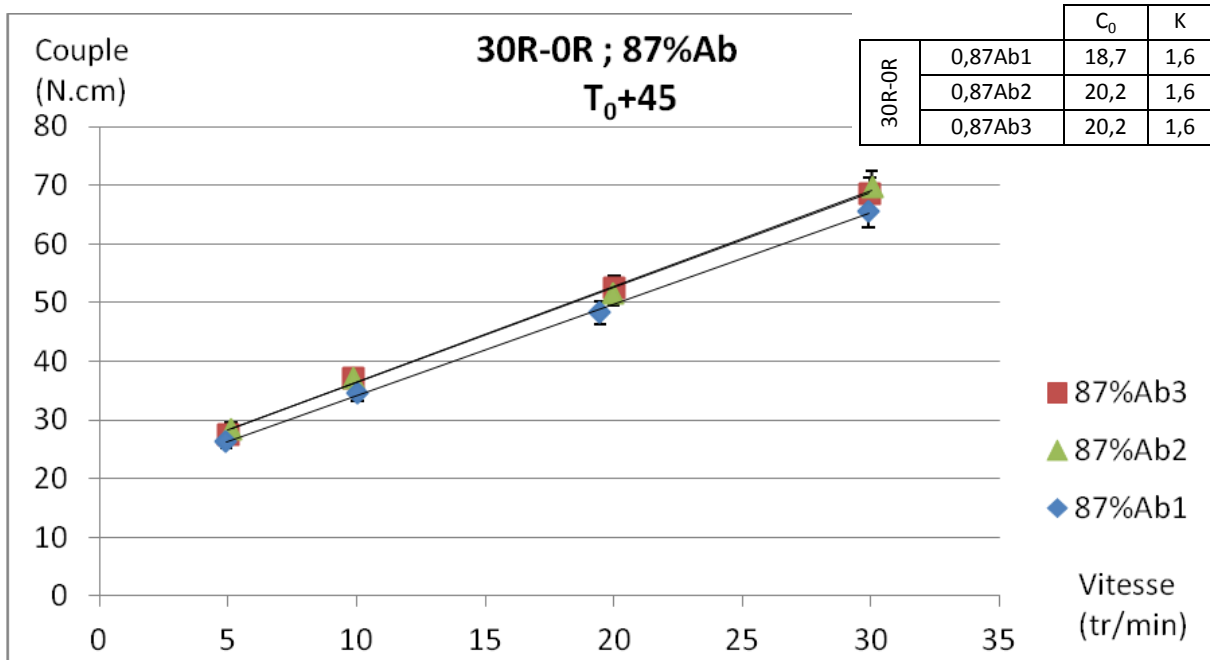


Figure 20 - Evolution du couple en fonction de la vitesse à T₀+45'
Béton 30R-OR ; 87%Ab

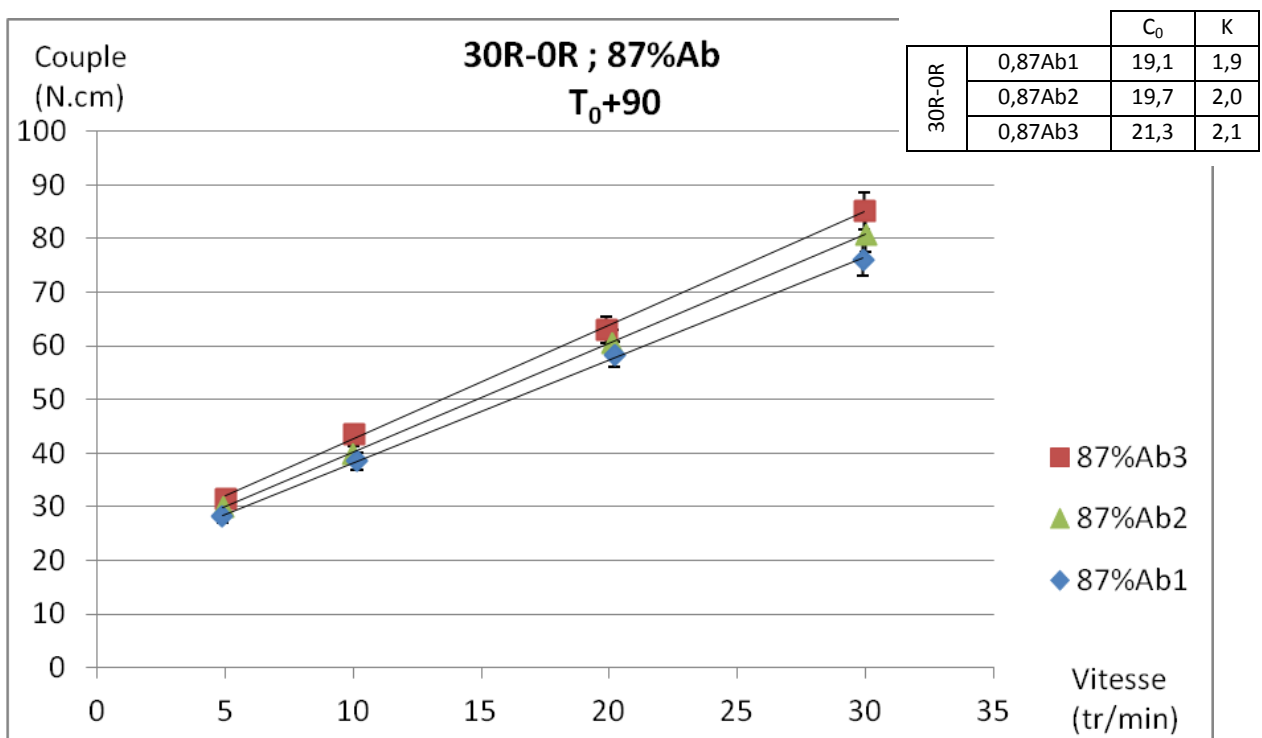


Figure 21 - Evolution du couple en fonction de la vitesse à T₀+90'
Béton 30R-OR ; 87%Ab

3.3.2 Evolution du couple en fonction de la vitesse dans le temps pour un taux de saturation donné

Comme déjà montré dans II.2.2.1, les résultats confirment la conclusion qu'il existe toujours une altération de l'écoulement dans le temps ce, quel que soit l'état hydrique des granulats recyclés (cf. annexe 3, § 5.3). L'altération des propriétés d'écoulement dans le temps est essentiellement due aux phénomènes irréversibles de l'hydratation, même après une agitation continue entre les échéances d'essai.

3.3.3 Evolution du couple en fonction de la vitesse par rapport au taux de saturation des granulats recyclés et pour une échéance de mesure donnée

Les Figures 22 à 24 présentent chacune à une échéance donnée l'évolution du couple en fonction de la vitesse pour l'ensemble des états hydriques étudiés du sable recyclé. A chaque échéance, le béton OR-OR est reporté afin de mieux mettre en évidence l'effet de l'incorporation du sable recyclé sur l'écoulement. Afin de simplifier la représentation, la moyenne et la dispersion sur les couples, issues des trois bétons 87%Ab, sont reportées sur les figures.

Les résultats consolident les conclusions déjà retirées lors de la phase 1:

- par comparaison à OR-OR, l'aptitude à l'écoulement est altérée à T_0 par l'incorporation de sable recyclé ; l'altération est la plus prononcée lorsque l'état hydrique du sable est au-delà du coefficient d'absorption (1,2Ab) (Figure 22);
- par comparaison à OR-OR, l'aptitude à l'écoulement est améliorée avec l'incorporation de sable recyclé à T_0+45' et $T_0 +90'$; les états hydriques, proche du (0,87Ab) et égal au coefficient d'absorption (1,0Ab), sont ceux qui confèrent au béton le meilleur écoulement (Figures 23 et 24) ;
- les états hydriques loin en-deçà de la valeur du coefficient d'absorption (0,33Ab et 0,5Ab) entraînent une augmentation significative de la viscosité (pente K) entre 45 minutes et 90 minutes après la fin du malaxage (de 2,3 à 3,6 pour 0,5Ab, de 2,1 à 3,8 pour 0,33Ab).

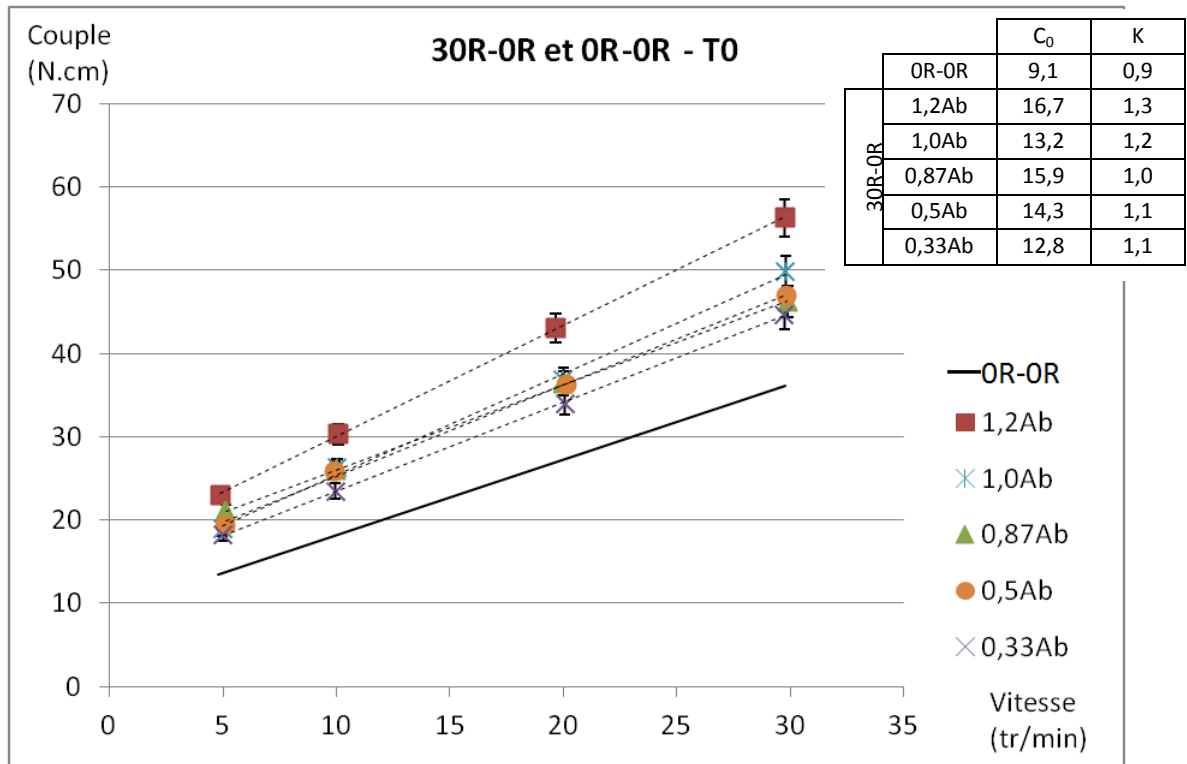


Figure 22 - Evolution du couple en fonction de la vitesse à T0
Béton 30R-OR et béton OR-OR

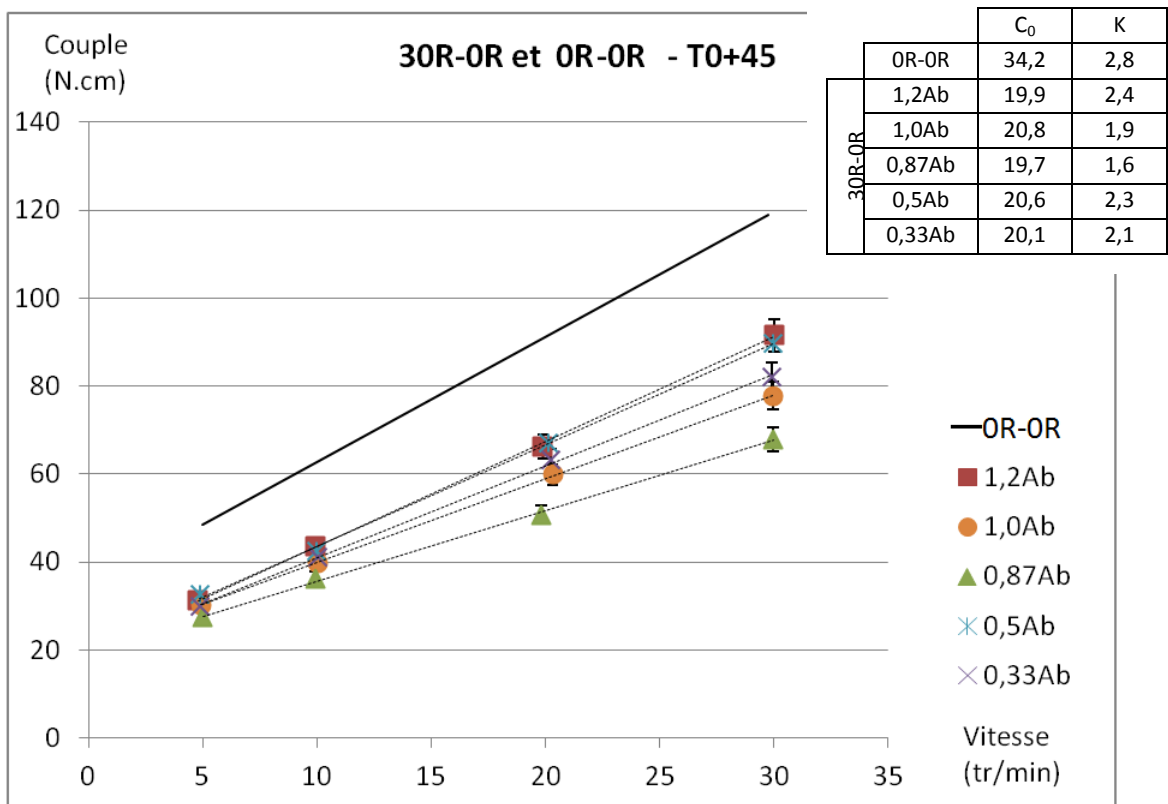


Figure 23 - Evolution du couple en fonction de la vitesse à T0+45
Béton 30R-OR et béton OR-OR

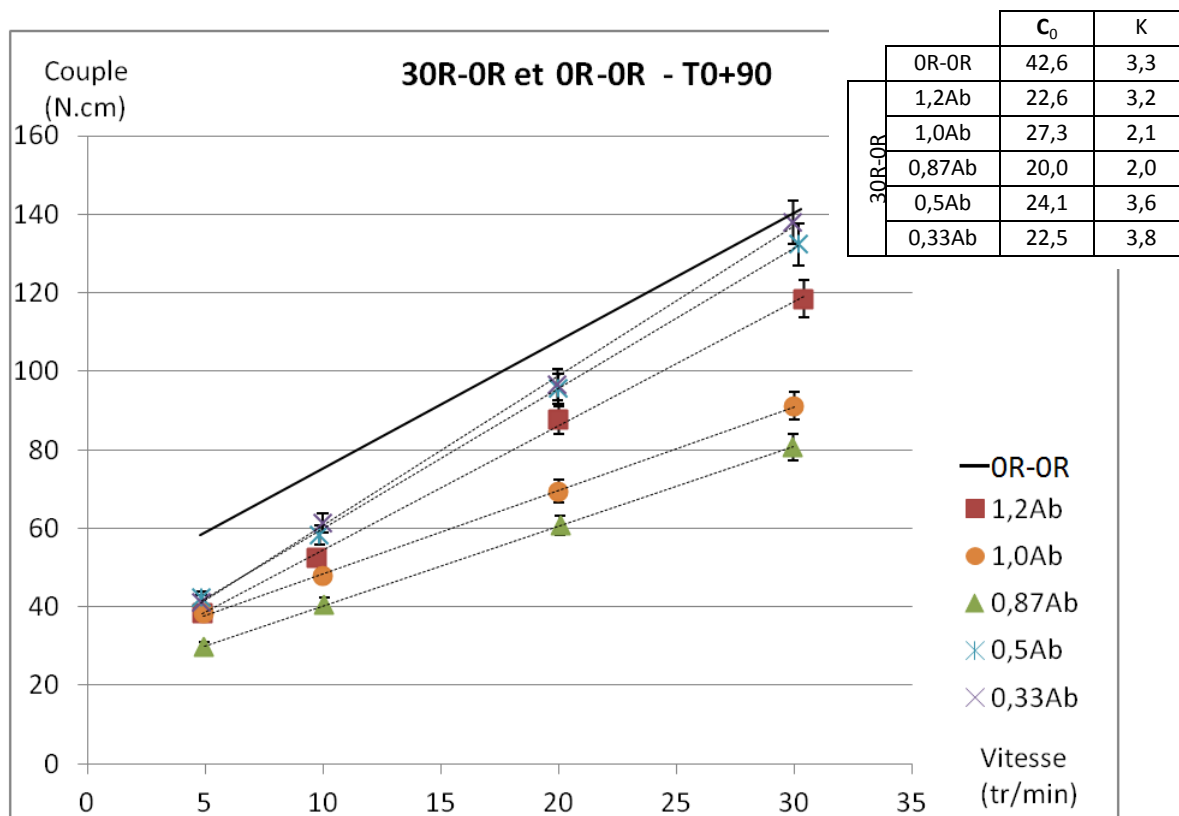


Figure 24 - Evolution du couple en fonction de la vitesse à T0+90
Béton 3OR-OR et béton OR-OR

3.4 Résistance mécanique

La Figure 25 présente l'ensemble des résultats de résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'état hydrique du sable recyclé et de l'échéance de fabrication des éprouvettes. L'ensemble des résultats est donné en annexe 4 (§ 5.4). On constate que :

- globalement, quelle que soit l'échéance de mise en place, la classe C25/30 est dégradée lorsque le sable recyclé est à un état hydrique proche (0,87Ab) ou égal (1,0Ab) de celui qui correspond au coefficient d'absorption à 24 heures ; ce résultat confirme donc la tendance observée lors de la phase 1 et exclut les interrogations sur la variabilité de l'échantillonnage du sable recyclé lors de la préparation des gâchées ;
- en parallèle, la classe C25/30 est conservée, quelle que soit l'échéance de mise en place, lorsque l'état hydrique du sable recyclé correspond à une sursaturation (1,2Ab) ou à une sous-saturation (0,33Ab et 0,5Ab).

Depuis la mise en place jusqu'à la prise, des mouvements d'eau en fonction de l'état hydrique des recyclés ont vraisemblablement pour effet de modifier le rapport Eau efficace/Liant de la matrice et également pour effet de modifier la structuration de l'interface matrice/sable recyclé par drainage et diffusion des espèces dissoutes des ou vers les grains de sable recyclé. Ces mouvements d'eau sont facilités dans le temps par la présence d'un retardateur et sont certainement accrus lorsque le

gradient hydrique sable recyclé/pâte est important (sable recyclé sursaturé ou sous-saturé). Il convient donc à ce stade de mener des investigations microstructurales afin d'expliquer les résultats obtenus.

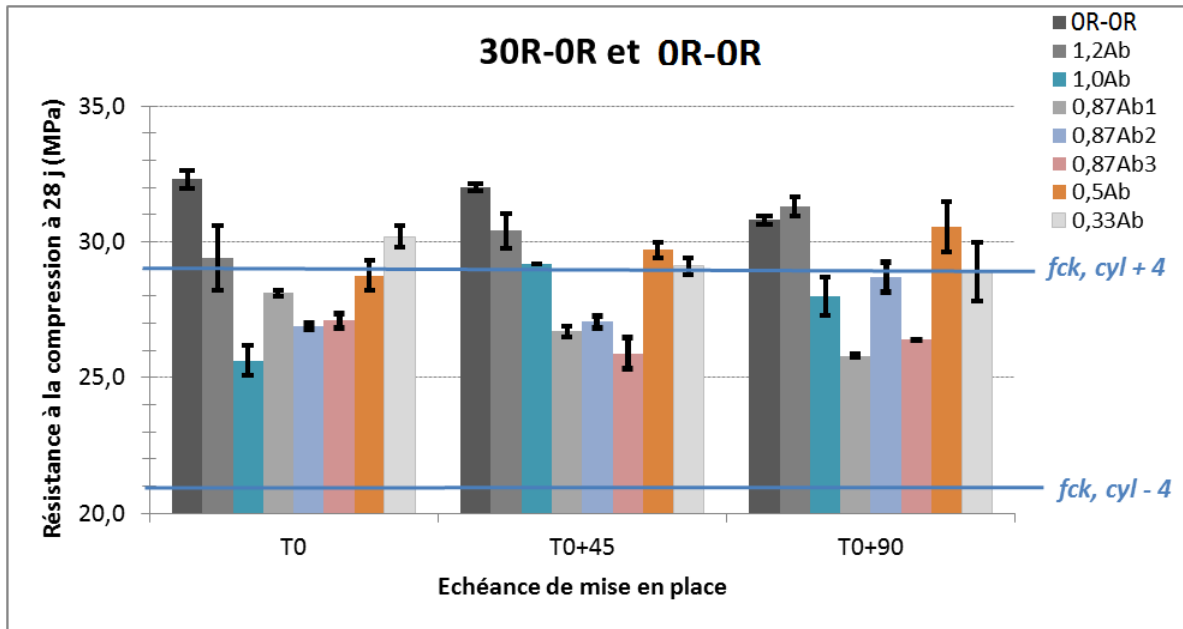


Figure 25 - Résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'état hydrique du sable recyclé et de l'échéance de mise en place – bétons 30R-OR et béton OR-OR

4 Conclusions générales

Ce rapport synthétise les résultats obtenus, au sujet de l'effet de l'état hydrique des granulats recyclés (gravillons ou sable), en substitution aux granulats naturels, sur les propriétés du béton à l'état frais (affaissement au cône, paramètres d'écoulement déterminés par essais rhéométriques) et à l'état durci (résistance à la compression à 28 jours).

Les essais ont été conduits sur des bétons dont la formulation n'incorporant que des granulats naturels (OR-OR) se situe dans la classe de résistance C25/30 pour une classe de consistance visée S4.

Durant la phase 1 du travail, deux taux de substitution aux granulats naturels ont été étudiés séparément :

- 100% massique des gravillons ;
- 30% massique du sable.

Dans le cas où 100% des gravillons naturels ont été substitués (OR-100R), trois états hydriques des gravillons recyclés ont été étudiés, définis à partir du coefficient d'absorption A_b mesuré à 24 heures (NF EN 1097) : $A_b + 1\%$, 75% de A_b et 30% de A_b .

Dans le cas où 30% du sable naturel a été substitué (30R-OR), trois états hydriques du sable recyclé ont été caractérisés, définis toujours à partir de A_b mesuré à 24 heures (NF EN 1097-6) : teneurs en eau de 120% de A_b , 87% de A_b et 33% de A_b .

Les granulats naturels ont toujours été incorporés à l'état hydrique qui correspond à A_b . Le choix de ces états hydrique a été arrêté après réunion téléphonique avec les partenaires du PN, le 18/10/2014.

Les caractérisations aux états frais et durci ont été systématiquement faites à trois échéances : fin du malaxage (T_0), T_0+45' et T_0+90' . Les deux dernières échéances ont été atteintes en maintenant une agitation continue du béton afin de simuler un transport.

Les résultats suivants peuvent être retenus pour la phase 1 :

- l'affaissement initial (T_0) varie peu ou pas pour une composition donnée malgré la variation de l'eau inter-grains avec l'état hydrique des recyclés (eau totale maintenue constante pour chaque composition étudiée) ; à ce stade, il serait souhaitable d'étudier la cinétique d'absorption des recyclés en fonction d'un état hydrique initial plus ou moins saturé mais également d'étudier cette cinétique avec une eau proche de la solution interstitielle du béton (eau de chaux en présence ou non d'alcalins et des adjuvants chimiques) ;
- la perte d'affaissement dans le temps est moindre lorsque les granulats recyclés sont dans un état hydrique loin en deçà de la saturation (OR-100R et 30R-OR) ; dans ce cas, le surdosage en superplastifiant n'a pas été nécessaire pour atteindre la classe S4 (OR-100R), et on note même le maintien de la classe S4 dans le temps (30R-OR), vraisemblablement favorisé par la présence du retardateur (30R-OR) ;

- par comparaison à OR-OR, l'aptitude à l'écoulement peut être altérée à T_0 par l'incorporation de granulats recyclés lorsque leur état hydrique est loin du coefficient d'absorption ; l'état au-delà du coefficient d'absorption est le plus préjudiciable ;
- par comparaison à OR-OR, l'aptitude à l'écoulement peut être améliorée avec l'incorporation de granulats recyclés à T_0+45' et T_0+90' ; l'état hydrique proche du coefficient d'absorption est celui qui confère au béton le meilleur écoulement ;
- lorsque l'état hydrique des granulats recyclés est en-deçà de la valeur du coefficient d'absorption, l'altération de l'écoulement est prononcée entre 45 minutes et 90 minutes après la fin du malaxage ;
- la substitution complète de gravillons recyclés aux gravillons naturels (bétons OR-100R) entraîne toujours la dégradation de la classe de résistance C25/30 ; cette dégradation est très marquée lorsque l'état hydrique des gravillons est en-deçà du coefficient d'absorption, quelle que soit l'échéance à laquelle les éprouvettes ont été confectionnées;
- la substitution de 30% massique de sable naturel avec du sable recyclé (30R-OR) entraîne essentiellement une dégradation de la classe de résistance C25/30 lorsque l'état hydrique du sable recyclé est le plus proche du coefficient d'absorption, quelle que soit l'échéance à laquelle les éprouvettes ont été confectionnées.

L'évolution singulière des résistances à 28 jours lorsque le sable naturel est remplacé par le sable recyclé est difficilement interprétable sur la base des données acquises. Afin de confirmer ou d'infirmer les tendances obtenues, il a été décidé, en réunion téléphonique avec les partenaires (10 juillet 2014), de mener les actions suivantes, dans une deuxième phase :

- répéter 2 fois le béton C25/30 30R-OR lorsque l'état hydrique initial du sable recyclé correspond à 0,87Ab ;
- encadrer la valeur de 0,87Ab en réalisant 2 bétons C25/30 30R-OR, le premier dans lequel l'état hydrique initial du sable recyclé correspond à l'absorption à 24 heures (1Ab), le second dans lequel le sable recyclé est incorporé à 0,5Ab.

Les résultats acquis lors de la phase 2 ont permis de confirmer les tendances observées lors de la phase 1, tant au niveau du comportement à l'état frais, qu'au niveau des résistances mesurées à 28 jours :

- l'écoulement des bétons est moins altéré dans le temps lorsque l'état hydrique du sable recyclé est proche ou égal de celui qui correspond à l'état saturé Ab ;
- les résistances sont plus faibles à 28 jours, quelle que soit l'échéance de mise en place, lorsque l'état hydrique du sable recyclé est proche ou égal de celui qui correspond à l'état saturé (Ab).

Les résultats de la phase 2 montrent que le protocole d'échantillonnage et de préparation du sable est répétable en laboratoire et que des investigations microstructurales doivent être menées pour expliquer les évolutions de résistances en fonction de l'état hydrique du sable recyclé.

5 Annexes

5.1 Données principales des constituants

Ciment (données fournisseur au moment de la réception)
CEM II/A-L 42,5N CE CP2 NF (HOLCIM – Rochefort)

COMPOSITION DÉCLARÉE (en %)			
Constituant		Régulateur de prise	
Clinker (K).....	87	Gypse	3,4
Laitier de haut-fourneau (S)	—	Anhydrite	—
Schiste calciné (T).....	—	Autre sulfate de calcium.....	—
Sulfate de calcium (Cs).....	—		
Pouzzolanes naturelles (P).....	—		
Cendres volantes siliceuses (V).....	—	Agent de mouture	HEA 252
Cendres volantes calcaïques (W).....	—	Sulfate ferreux	0,25
Calcaires (L ou LL).....	11		
Constituants secondaires.....	2		

RESISTANCES A LA COMPRESSION (en MPa)			
1 jour	—	2 jours	29
		7 jours	—
		28 jours ...	53

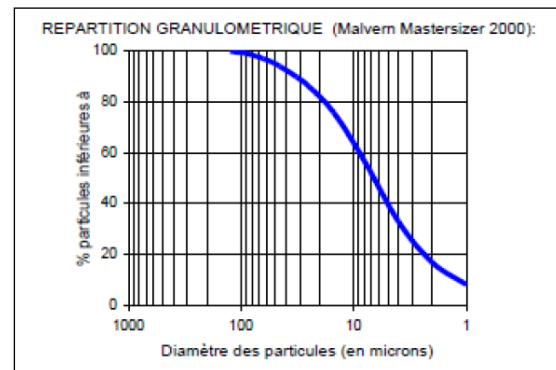
CARACTÉRISATION PHYSIQUE					
Sur poudre		Sur pâte pure		Sur mortier	
Masse volumique (en g/cm ³)	3,09	Besoin en eau (en %)	27,9	Chal. hydr. 41h (en J/g)	—
Surface massique (en cm ² /g)	3700	Stabilité (en mm)	1,1		
Indice de clarté	59,6	Début de prise (en min)	150		

CARACTÉRISATION CHIMIQUE															
PAF	INS	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	S ⁻	Cl	CO ₂	CaO _{free}	Na ₂ O éq actif	
5,1	1,0	18,7	4,9	3,7	62,0	1,3	2,7	0,68	0,17	0,05	0,04	4,7	1,5	0,59	
Composition potentielle du clinker :					C3A	7,9		C3S	61		C4AF	12			

Filler calcaire (données fournisseur au moment de la réception)

BETOCARB HP-OG (OMYA – Orgon)

CaCO ₃	98.8	%
Carbonates totaux	99.1	%
Chlorures	0.001	%
Sulfates	0.001	%
Soufre total	0.005	%
Matières organiques	0.01	%
Essai au bleu de méthylène	0.3	g/kg
Alcalins équivalents	0.005	%
Silice totale	0.1	%
Réactivité aux alcalins	NR	
Granulométrie:		
- Particules < 2 mm	100	%
- Particules < 0.125 mm	100	%
- Particules < 0.063 mm	97	%
- Surface spécifique Blaine	462	m ² /kg
Blancheur CIE L*		
	95	
Indice d'activité à 28 jours		
	0.79	
Taux d'humidité départ usine		
	0.2	%
Densité		
	2.7	g/ml
Densité apparente tassée		
	1.5	g/ml



Superplastifiant (extrait fiche technique)

MC – Power Flow 3140 (MC Chimie)

Paramètres	Unité	Valeur	Observation
Densité	Kg/L	env. 1,06	valeur moyenne
Plage de dosage recommandée	%	0,2 à 3,0	du poids de ciment
Teneur max. en chlorure	% de masse	≤ 0,10	
Teneur max. en alcalins	% de masse	≤ à 1,5	
Extrait sec.	%	29,8-31,8	(methode infrarouge)
pH		4,5-6,5	

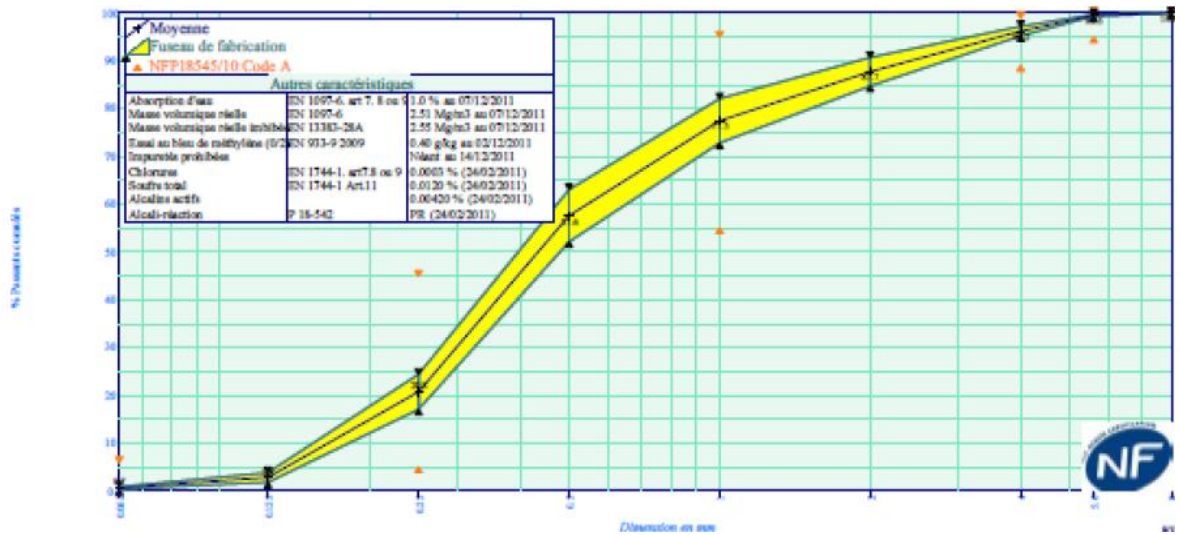
Retardateur de prise (extrait fiche technique)

Centrament Retard 270 (MC Chimie)

Paramètre	Unité	Valeur	Observations
Densité volumique	kg/dm ³	env. 1,08	
Dosage recommandé	g	2 - 8	par kg de ciment
Teneur maximale en ions chlorure:	% de taux de masse	≤ 0,10	
Teneur maximale en alcalins:	% de taux de masse	≤ 1,0	
Extrait sec	%	18,53-20,48 19,29-21,32	(methode infrarouge) (EN 480-8)
pH	-	6,5-9,5	

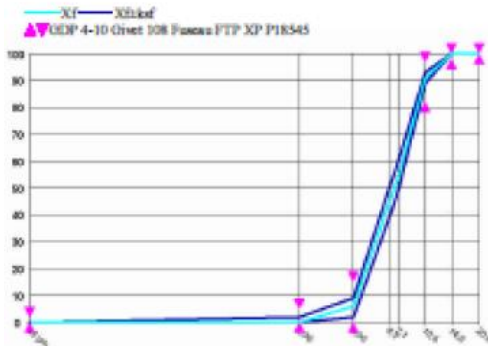
Sable naturel (extrait fiche technique)
0/4 SC L NF (Lafarge Granulats – Sandrancourt)

	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	D	1.4D	2D	FM	SE10	f
Etendue e	8		40		40		10			0.8		8
V.S.S.+U			46		96		100			2.95		11.00
V.S.S.	6.0		45		95		99			2.80		10.00
V.S.I.			5		55		89	95	100	2.20	65.0	
V.S.I.-U			4		54		87	94		2.05		
Ecart-type max			12.12		12.12					0.18		



Gravillon naturel(extrait fiche technique)
4/10 Cal CL NF (Lafarge Granulats – Givet)

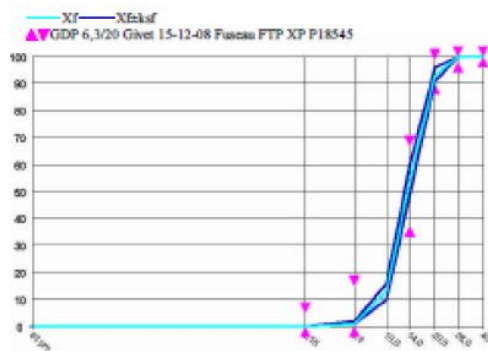
Nom	Symbole	Vsi	Vss	u	Vsi - u	Vss + u	Li	Le	e	e / 3,3
2 D	20 mm	100	100							
1.4 D	14 mm	98	100	1	97	100				
D	10 mm	84	99	5	77	100	80	99	15	
d	4 mm	0	15	5	0	20	0	20	15	
d/2	2 mm	0	5	1	0	6				
Fines	0.063 mm		1.5	0.3		1.8				
Aplatissement	A		35	4		39				
Absorption	Ab		2.5	0.5		3				
Los Angeles	LA		30	3		33				
Gel	F		2							
Soufre	S		1	0.1		1.1				
Sulfates	AS		0.2	0.15		0.35				



Date	Nom de l'essai	Norme essai	Symbole	Valeur
24/01/11	Abs d'eau (%)	NF EN 1097-6 articles 7	WA24	0.62
04/04/11	Alcalins solubles (%)	LPC n°37	Na2O eq	0.0012
14/12/11	Aplatissement (%)	NF EN 933-3	FI	16.7
28/09/11	Boulettes d'Argile (%)	XP P 18-545 10-1-6	BA	0.01
04/04/11	Chlorure+eau (pot) (%)	NF EN 1744-1 art 8	C	0.0240
28/09/11	Impuretés prohibées (%)	XP P 18545 3-42	Imp	0.01
03/10/11	LA+MDE (%)	P18 545 8 1	%	40
03/10/11	Los Angeles ()	NF EN 1097-2 article 5	LA	21
03/10/11	Micro-Deval ()	NF EN 1097-1	MDE	19
24/01/11	MV absolue 0/63 - μ a (t/m	NF EN 1097-6 articles 7	MVA (Absol	2.74
24/01/11	MV réelle - μ rd (t/m3)	NF EN 1097-6 articles 7	prd	2.69
24/01/11	MV réelle saturation 0/63 - μ ss	NF EN 1097-6 articles 8	MVS	2.71
04/04/11	Qualification Alkali	FD P18-542		NR
04/04/11	Soufre total (%)	NF EN 1744-1 article 11	S	0.360
04/04/11	Sulfates dans acide (%)	NF EN 1744-1 article 12	AS	0.013

4/10 Cal CL NF (Lafarge Granulats – Givet)

Nom	Symbole	V _{si}	V _{ss}	u	V _{si} - u	V _{ss} + u	Li	Ls	e	e / 3,3
2D	40 mm	100	100							
1,4D	28 mm	98	100	1	97	100				
D	20 mm	90	99	5	85	100				
D/1,4	14 mm	37	67	6	31	73	25	70	30	9,09
d	6.3 mm	0	15	5	0	20				
d/2	3.15 mm	0	5	1	0	6				
0,063	0.063 mm	0	1.5	0.3						
FI	FI		20	4		24				
LA	LA		30	3		33				
Ab	Ab		2.5	0.3		2.8				
Impuretés prohibées	IP		0.1							
Teneur en soufre tot	S%		1	0.1		1.1				
Boulettes d'argile	Arg		1							
MBf	MBf		10	2		12				
Temuer enfine	F		1.5	0.3		1.8				



Date	Nom de l'essai	Norme essai	Symbole	Valeur
25/01/11	Abs d'eau (%)	NF EN 1097-6 articles 7	WA24	0,57
05/04/11	Alcalins solubles (%)	LPC n°37	Na2O eq	0,0012
21/11/11	Aplatissement (%)	NF EN 933-3	FI	10,9
04/10/11	Boulettes d'Argile (%)	XP P 18-545 10-1-6	BA	0,01
04/04/11	Chlorure+eau (pot) (%)	NF EN 1744-1 art 8	C	0,0240
04/10/11	Impuretés prohibées (%)	XP P 18545 3-42	ImP	0,01
05/10/11	LA+MDE (%)	P18 545 8 1	%	40
05/10/11	Los Angeles (.)	NF EN 1097-2 article 5	LA	21
04/04/11	Matière humique	NF EN 1744-1 art 15.1	Couleur	0,024
05/10/11	Micro-Deval (.)	NF EN 1097-1	MDE	19
25/01/11	MV absolue 0/63 - μ a (t/m)	NF EN 1097-6 articles 7	MVA (Absol	2,74
31/03/11	MV réelle - μ rd (t/m3)	NF EN 1097-6 articles 7	prd	0,00
25/01/11	MV réelle saturé 0/63 - μ ss	NF EN 1097-6 articles 8	MVS	2,71
04/04/11	Qualification Alcali	FD P18-542		NR
04/04/11	Soufre total (%)	NF EN 1744-1 article 11	S	0,360

5.2 Récapitulatif des coefficients C_0 (couple seuil dynamique) et K (propriété visqueuse) obtenus pour les différents bétons testés

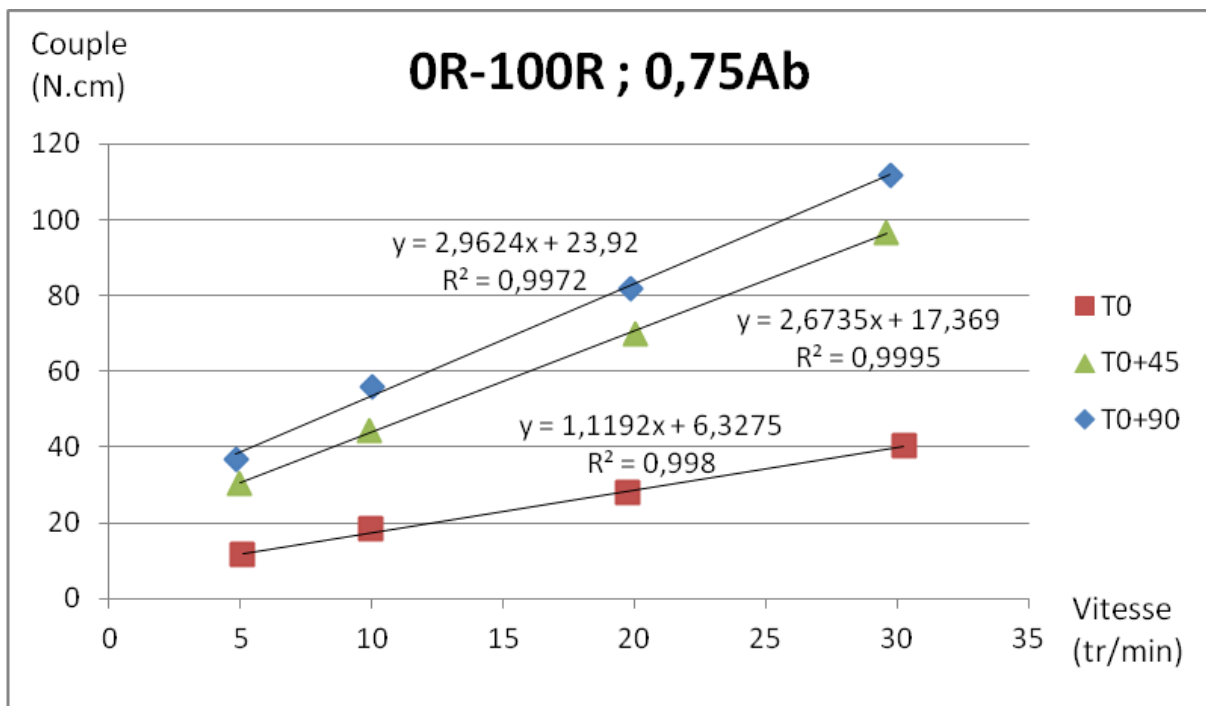
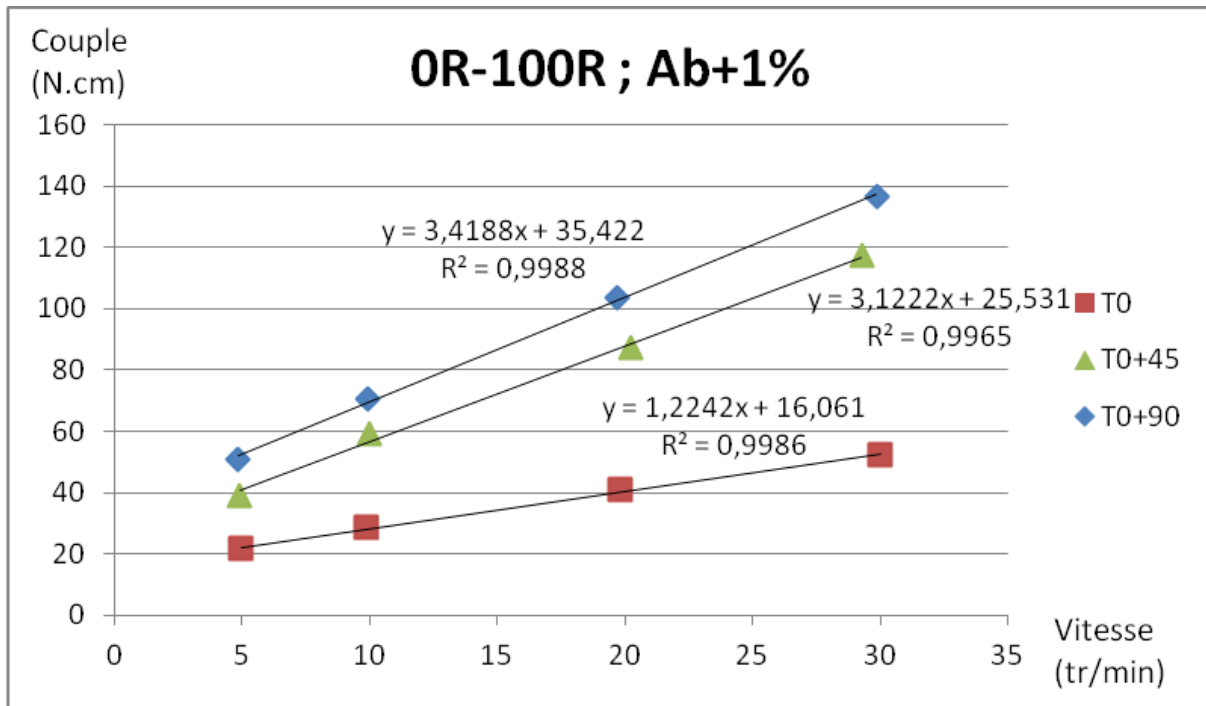
C_0 [N.cm]

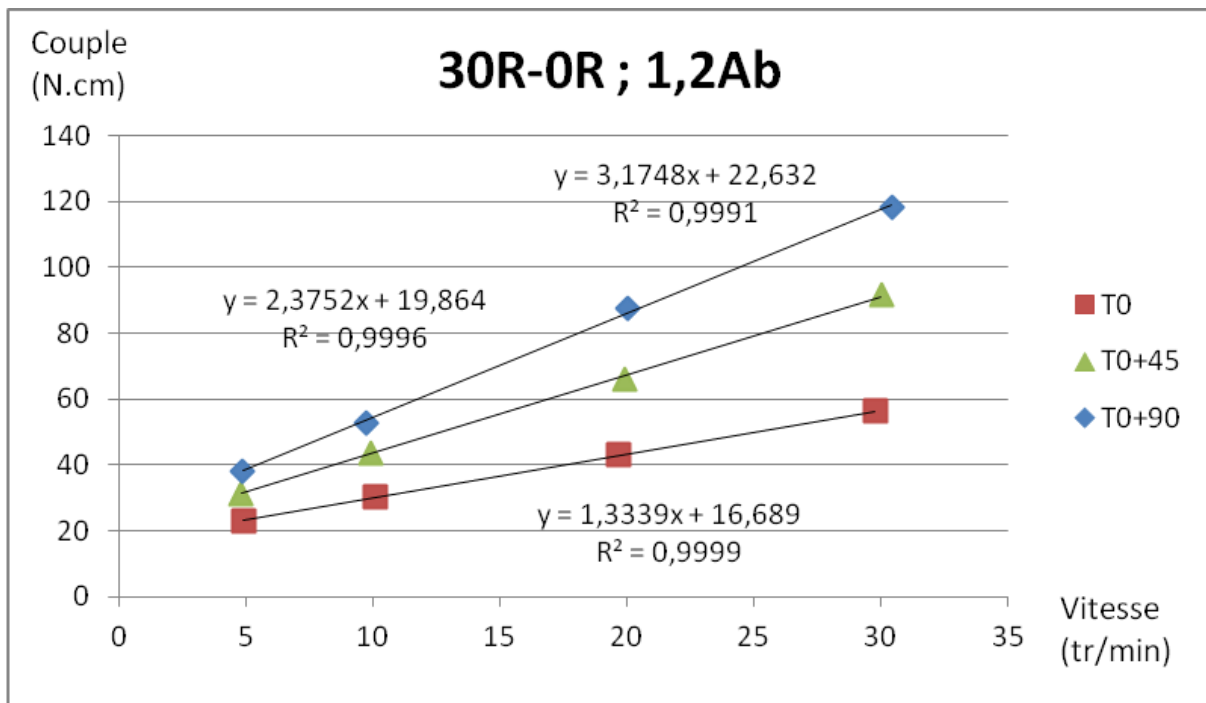
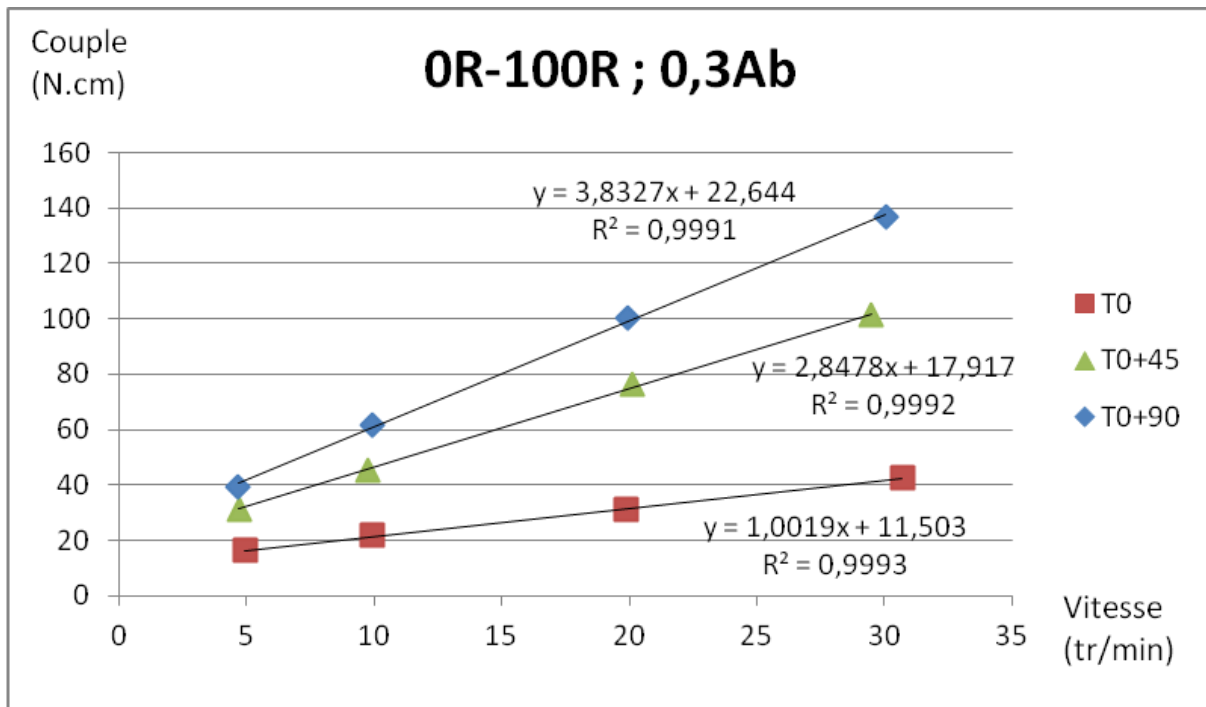
	C25/30 OR-100R	C25/30 OR-100R			C25/30 30R-OR						
	Ab	Ab+1%	0,75Ab	0,3Ab	1,2Ab	1Ab	0,87Ab1	0,87Ab2	0,87 Ab3	0,5Ab	0,3Ab
T_0	9,1	16,1	6,3	11,5	16,7	13,2	15,9	16,1	15,6	14,3	12,8
T_0+45	34,2	25,5	17,4	17,9	19,9	20,8	18,7	20,3	20,2	20,6	20,1
T_0+90	42,6	35,4	23,9	22,6	22,6	33,2	19,1	21,3	19,7	24,1	22,5

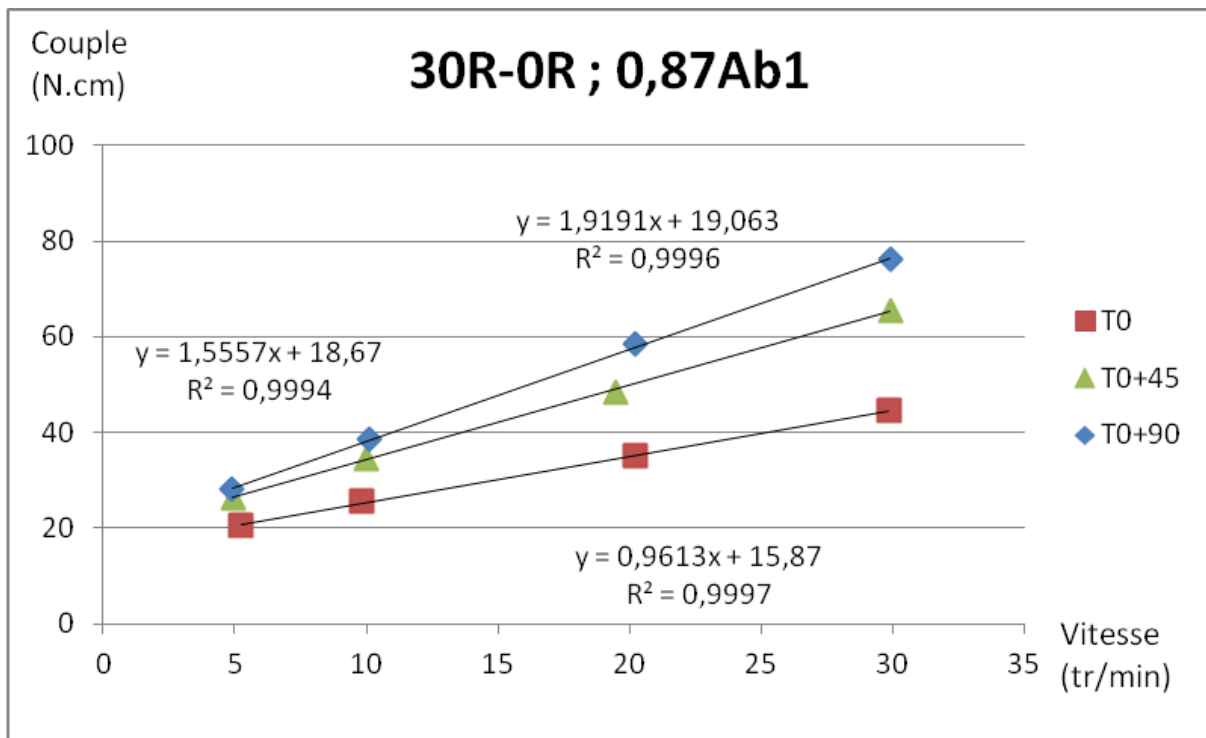
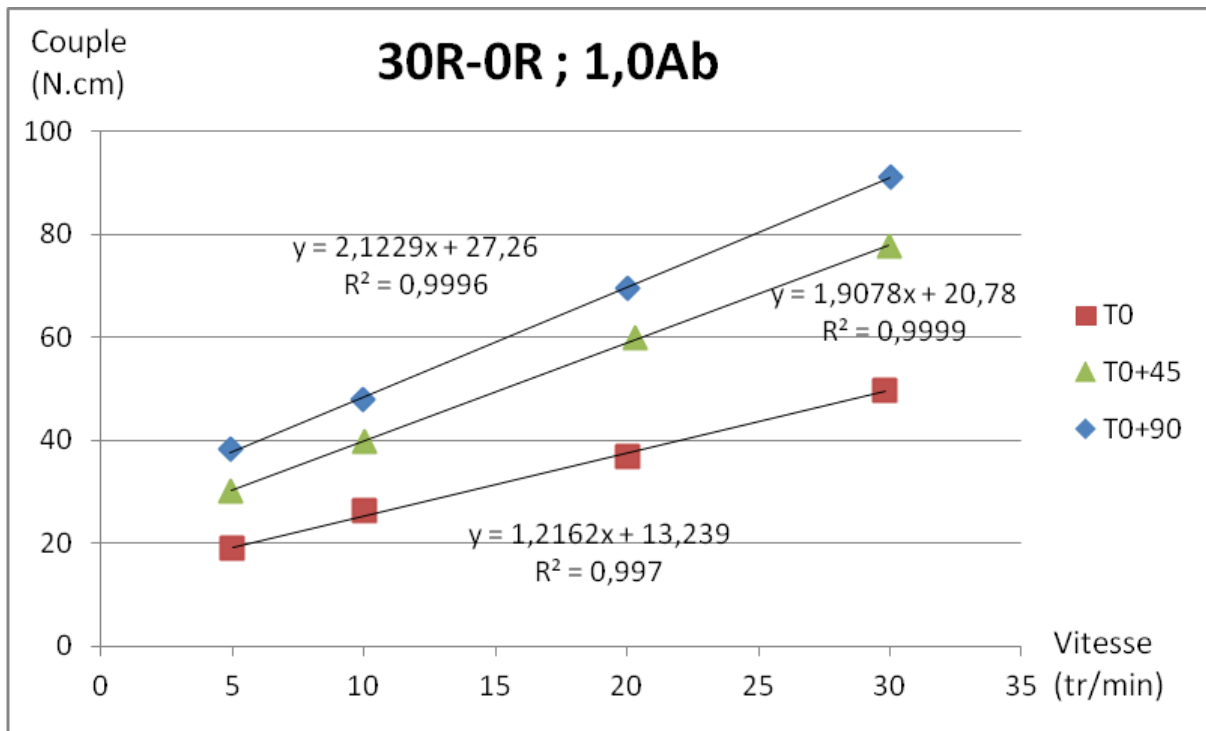
K [N.cm tr⁻¹ min]

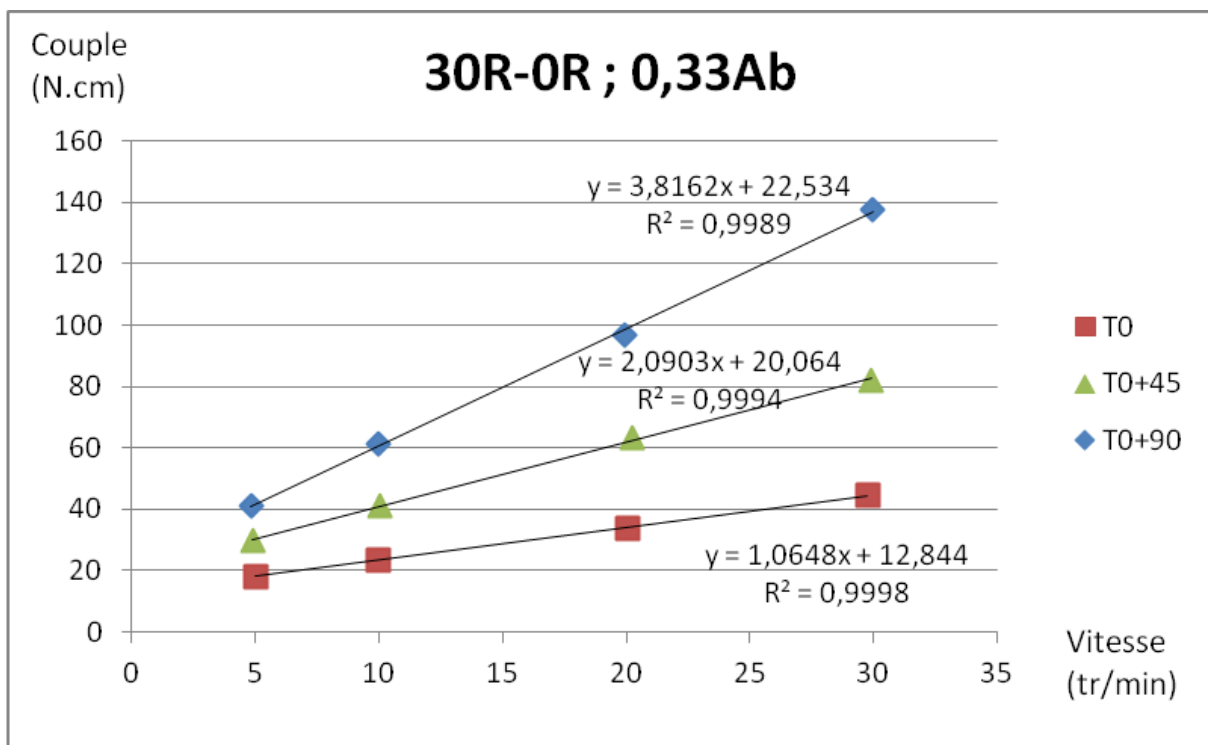
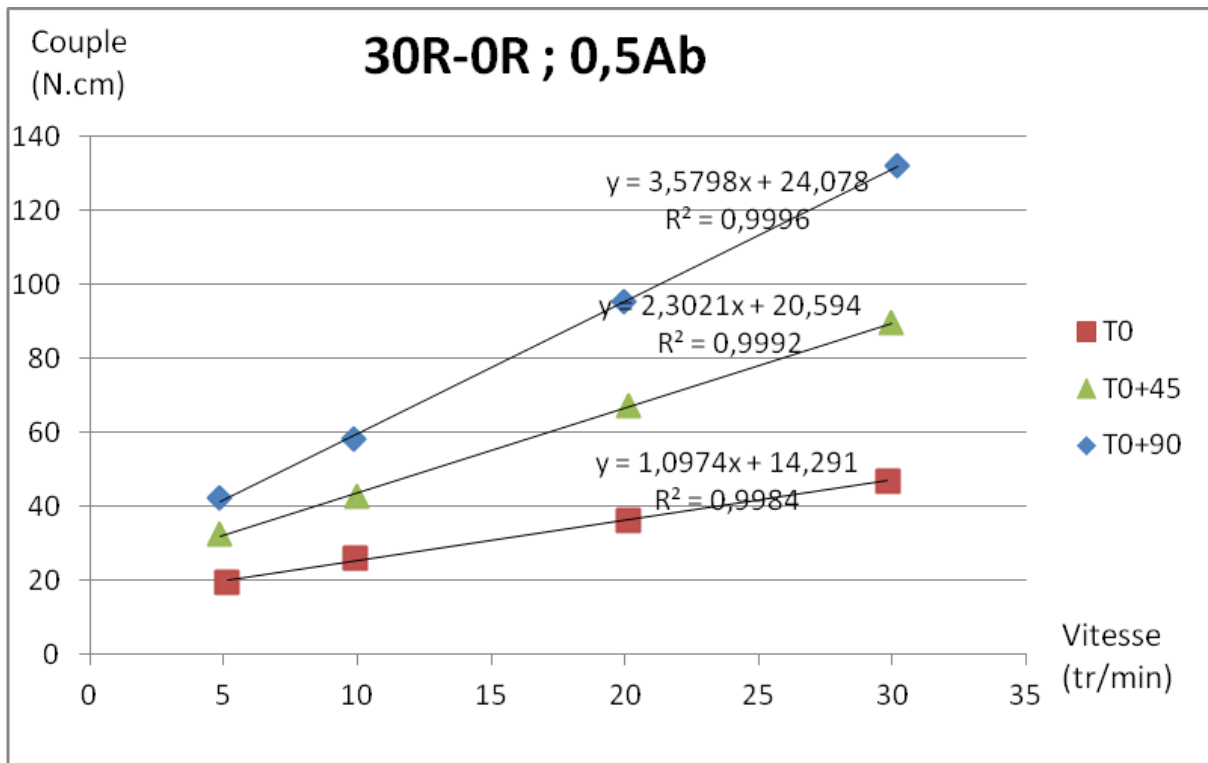
	C25/30 OR-100R	C25/30 OR-100R			C25/30 OR-100R						
	Ab	Ab+1%	0,75Ab	0,3Ab	1,2Ab	1Ab	0,87Ab1	0,87Ab2	0,87 Ab3	0,5Ab	0,3Ab
T_0	0,9	1,2	1,1	1	1,3	1,2	1	1,1	1	1,1	1,1
T_0+45	2,8	3,1	2,7	2,8	2,4	1,9	1,6	1,6	1,6	2,3	2,1
T_0+90	3,3	3,4	3	3,8	3,2	2,1	1,9	2	2,1	3,6	3,8

5.3 Evolution du couple en fonction de la vitesse dans le temps pour un taux de saturation donné









5.4 Valeurs (moyenne et écart-type) sur les résistances mécaniques à la compression mesurées à 28 jours

Le tableau suivant synthétise les résultats (moyenne et écart-type résultants de trois mesures indépendantes pour chaque béton) de la résistance à la compression mesurée à 28 jours après cure humide ($20^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$; $95\% \pm 5\%$ HR).

Phase 1

Béton		Réf	OR-100R			30R-OR		
Echéance de confection des éprouvettes	Taux de saturation	Ab	Ab+1%	0.75Ab	0.3Ab	1,2Ab	0,87Ab1	0,33Ab
T_0		32,3 $\pm 0,4$	27,0 $\pm 0,2$	27,3 $\pm 0,5$	25,0 $\pm 1,0$	29,4 $\pm 1,2$	28,1 $\pm 0,1$	30,2 $\pm 0,4$
T_{0+45}		32,0 $\pm 0,1$	28,9 $\pm 0,9$	29,1 $\pm 1,1$	26,6 $\pm 0,3$	30,4 $\pm 0,6$	26,7 $\pm 0,2$	29,1 $\pm 0,3$
T_{0+90}		30,8 $\pm 0,1$	29,2 $\pm 0,6$	28,9 $\pm 0,1$	28,2 $\pm 0,1$	31,3 $\pm 0,4$	25,8 $\pm 0,1$	28,9 $\pm 1,1$

Phase 2

Béton		30R-OR			
Echéance de confection des éprouvettes	Taux de saturation	1,0Ab	0,5Ab	0,87Ab2	0,87Ab3
T_0		25,6 $\pm 0,6$	28,8 $\pm 0,6$	26,9 $\pm 0,1$	27,1 $\pm 0,3$
T_{0+45}		29,2 $\pm 0,0$	29,7 $\pm 0,3$	27,1 $\pm 0,2$	25,9 $\pm 0,6$
T_{0+90}		28,0 $\pm 0,7$	30,6 $\pm 0,9$	28,7 $\pm 0,6$	26,4 $\pm 0,0$