



ÉCONOMIE CIRCULAIRE DANS LE DOMAINE DE LA CONSTRUCTION - NORMALISATION DES BÉTONS DE GRANULATS RECYCLÉS

Comité d'orientation du BNTRA 2023

10 mars 2023

*M. BODET (Président BNTRA/CNGRA)
Mme ALBERT (AFNOR/P18B)
M. COYERE (Président BNTRA/CNEC2)*

SOMMAIRE

Partie 1 : Evolutions de la norme granulats NF P18-545

Partie 2 : Règles d'utilisation des granulats recyclés dans les bétons – NF EN 206+A2/CN

Partie 3 : Calcul des structures en béton de granulats recyclés – normes « Eurocode 2 »



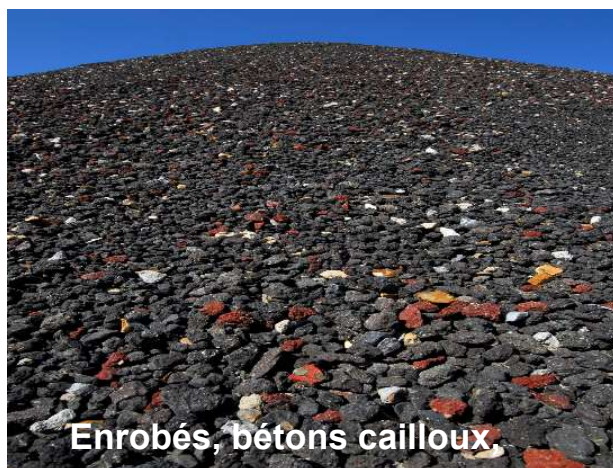
GRANULATS RECYCLÉS

De quoi parle-t-on ?



Granulats recyclés issus de démolition

- NF EN 12620 Granulats pour béton
- NF EN 13242 Granulats pour assises de chaussées (fondation, base et liaison)
- NF P18-545 « Granulats », articles 7, 9 et 10



Agrégats d'enrobés et produits de démolition de routes

- NF EN 13242 Granulats pour assises de chaussées
- NF P18-545, article 7
- NF EN 13108-8 Agrégats d'enrobé (hors granulats)



Granulats artificiels et co-/sous-produits industriels

- NF EN 13 242 Granulats pour assises de chaussées
- NF P18-545, articles 7, 9 et 10

Économie circulaire dans le domaine de la construction -
Normalisation des bétons de granulats recyclés

GRANULATS RECYCLÉS : DÉFINITIONS NF P18-545

Granulats recyclés et granulats de prémélange

- **Granulat recyclé** : granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés dans la construction (cf. process de fabrication ① à ④)

Nouveau

- Un **granulat de prémélange** est un mélange :
 - de granulats recyclés et de granulats naturels selon des pourcentages définis uniquement entre des gravillons naturels et recyclés ou des sables naturels et recyclés ou des graves naturelles et recyclées
 - **uniquement pour un usage béton (art. 9 et 10)**
 - désigné par Tx, suivi d'un nombre :
exemple : Tx10, 10% de granulat recyclé dans le granulat de prémélange



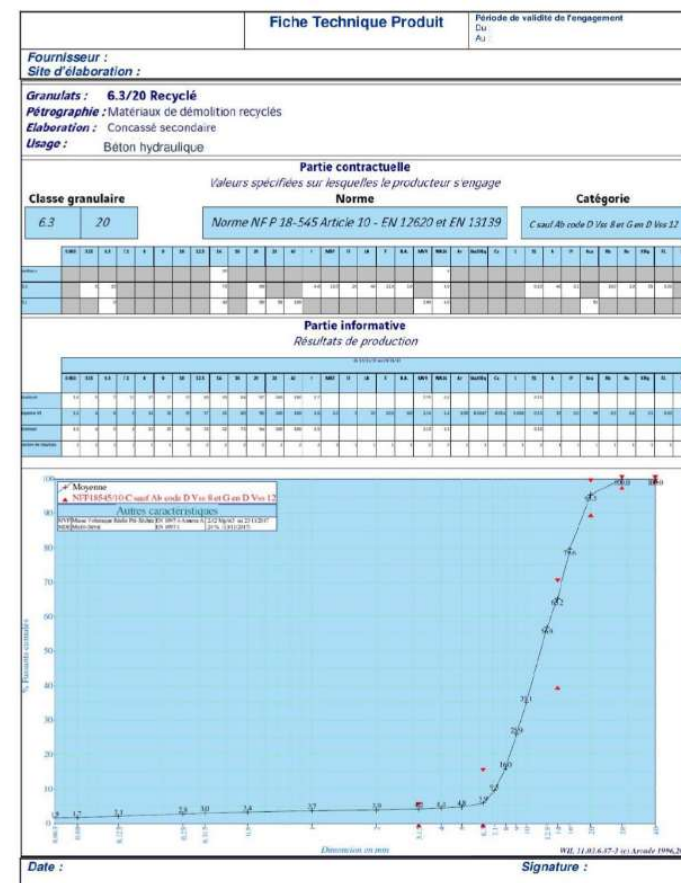
NB : Un béton incorporant moins de 1% de granulats recyclés est considéré comme étant un béton de granulats naturels cf. NF EN 206+A2/CN

GRANULATS RECYCLÉS : CONTRÔLES SELON L'USAGE DÉFINI DANS LA NF P18-545

Des procédures qualité pour assurer la fiabilité des contrôles

Le Plan d'Assurance Qualité (PAQ) de l'exploitant de l'installation de recyclage décrit les modalités pratiques de réalisation et de contrôle spécifiques à une installation ou un chantier

FTP : ensemble des résultats des essais les plus récents effectués par le fournisseur depuis moins de 6 mois de production, pris dans une période maximale de 36 mois calendaires consécutifs



GRANULATS RECYCLÉS : MARQUAGE CE

Comme tout granulats, le granulats recyclé fait l'objet d'un marquage CE obligatoire



- Déclaration des performances
- Etiquette CE

DECLARATION DES PERFORMANCES
Selon le Règlement Produits de Construction (UE) 305/2011

N° (le mode de numérotation est libre mais le numéro doit être unique)

SITE DE PRODUCTION : PARIS (75)

Coordonnées du producteur :	Société DUPONT & CO 3 rue des granites 01099 Granulat sur Caillou
------------------------------------	---

Évaluation et vérification de la constance des performances :
Système 2+

Les pages suivantes mentionnées sont identiques aux étiquettes CE actuelles.

Code d'identification unique	Identification du produit	Pétriographie	Usages prévus						Performances déclarées
			NF EN 12620 (a) (*)	NF EN 13139 (b)	NF EN 13043 (c)	NF EN 13242 (d)	NF EN 13450 (e)	NF EN 13383-1 (f)	
7800701	0/4 C	Giroux	-	-	X	-	-	-	Voir page(s) suivante(s)
7800702	0/2 CL	Giroux	-	-	X	-	X	-	Voir page(s) suivante(s)
7800703	0/4 CL	Giroux	-	-	X	-	-	-	Voir page(s) suivante(s)
7800704	4/6.3 C	Giroux	-	-	X	-	X	-	Voir page(s) suivante(s)
7800705	6.3/20 C	Giroux	-	-	X	-	-	-	Voir page(s) suivante(s)
7900001	0/4 R	Alluv. silico-calcaire	X	X	-	-	-	-	Voir page(s) suivante(s)
7900002	4/10 R	Alluv. silico-calcaire	X	-	-	-	-	-	Voir page(s) suivante(s)
7900003	10/20 R	Alluv. silico-calcaire	X	-	-	-	X	-	Voir page(s) suivante(s)

(*) A l'exclusion des bétons de chaux

(a) NF EN 12620+A1 : 2008 - Granulats pour béton
 (b) NF EN 13139 : 2003 - Granulats pour mortiers
 (c) NF EN 13043 : 2003 - Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, autoroutes et d'autres zones de circulation
 (d) NF EN 13242+A1 : 2008 - Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les trottoirs de gnie civil et pour la construction des chaussées
 (e) NF EN 13450 : 2003 - Granulats pour ballasts de voies ferrées
 (f) NF EN 13383-1 : 2003 - Enrochements

L'organisme notifié XXXX n° XXXX a délivré un certificat de conformité du contrôle de la production en usine n° XXXX selon le système 2+, en s'appuyant sur l'inspection initiale du site de production et du contrôle de production en usine et ainsi que sur la surveillance, l'évaluation et l'appréciation permanentes du contrôle de production en usine.

Nous déclarons que les performances de tous les granulats référencés ci-dessus sont conformes à celles déclarées indiquées sur le(s) page(s) suivante(s).
La présente déclaration des performances est établie sous notre seule responsabilité.

Fait à le

« Nom et fonction »

GRANULATS RECYCLÉS POUR LE BÉTON

Prise en compte des conclusions du Projet National RECYBETON (2012/18)

Recommandations



47 partenaires (maîtres d'ouvrage, entreprises de construction, producteurs de matériaux, ingénieries, assureurs, organismes de recherche)

Étude des bétons de granulats recyclés :

- Bibliographie
- Essais en laboratoire
- Modélisations
- 5 chantiers expérimentaux

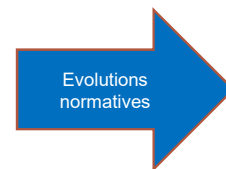
<http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/librairie/collections-ifsttar/ouvrages-edites-par-ifsttar/e-beton-recycle/>

Ouvrage scientifique



BUREAU de NORMALISATION des TRANSPORTS, des ROUTES et de leurs AMÉNAGEMENTS par délégation d'AFNOR

GRANULATS NF P18-545 (octobre 2021)



BETONS NF EN 206+A2/CN (novembre 2022)



DIMENSIONNEMENT
Amendement A1 à la norme française homologuée NF EN 1992-1-1/NA (Novembre 2022)

FEU
Amendement A2 à la norme française homologuée NF EN 1992-1-2/NA (Février 2023)

GRANULATS RECYCLÉS POUR LE BÉTON

En plus des essais usuels, des essais spécifiques aux granulats recyclés NF P18-545, article 10 : granulats pour béton

- **Caractéristiques usuelles des granulats** : granulométrie, aplatissement, module de finesse, propreté, masse volumique, absorption d'eau, Los Angeles, alcali-réaction ...
- **Caractéristiques complémentaires des granulats recyclés**
 - Classification des gravillons recyclés
 - Sulfates solubles dans l'eau
 - Constituants réduisant le temps de prise et la résistance du béton
- **Caractéristiques complémentaires des granulats de prémélange**
 - Le gravillon recyclé du prémélange doit respecter les exigences du recyclé pur (classification, sulfates, Los Angeles, aplatissement, temps de prise)
 - Taux massique de recyclés dans le prémélange Tx : → à déclarer

Nouveau

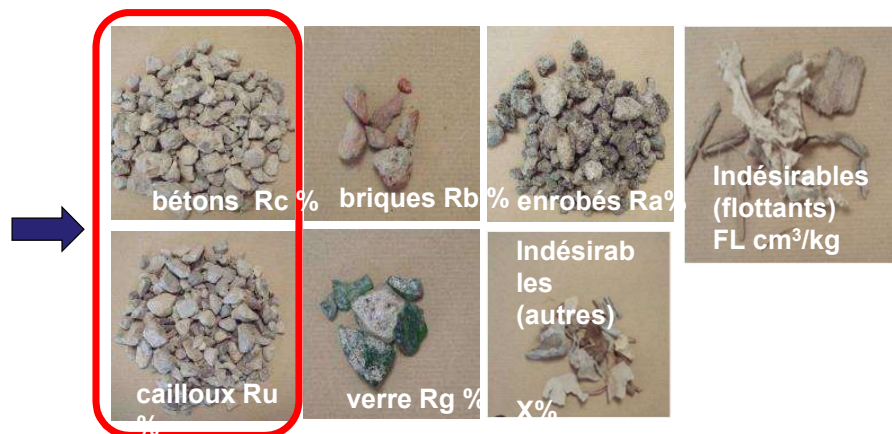
GRANULATS RECYCLÉS POUR LE BÉTON

En plus des essais usuels, des essais spécifiques aux granulats recyclés

- Caractérisation géotechnique afin de déterminer la famille d'appartenance des matériaux alternatifs (BÉTON, ENROBÉ ou MIXTE)



Essai de tri (EN 933-11)



Pour les usages NF EN 206+A2/CN

Bétons hydrauliques et mortiers : code CR_B : Rcu ₉₅ ; Rb ₁₀₋ ; Ra ₁₋ ; XRg _{0,5-} ; FL _{0,2-} code CR_C : Rcu ₉₀ ; Rb ₁₀₋ ; Ra ₁₋ ; XRg ₁₋ ; FL ₂₋
Bétons routiers : Rcu 90 Ra 10- XRg 0,5- FL 0,2- (FL2- en fondation)
Assises de chaussées : Rcu ₉₀ ou Rcu ₇₀ ou Ra ₈₀ Rg ₂₋ ou Rg ₅₋ (enrobés) ou non requis X ₁₋ FL ₅₋

- 3 types de granulats recyclés définis dans la norme NF EN 206+A2/CN

- Type 1 si toutes les caractéristiques (incluant la classification) sont classées CR_B
- Type 2 (si CR_B ou CR_C)
- Type 3 (si uniquement CR_C)

cf. présentation suivante

Économie circulaire dans le domaine de la construction -
Normalisation des bétons de granulats recyclés

GRANULATS RECYCLÉS POUR LE BÉTON

En plus des essais usuels, des essais spécifiques aux granulats recyclés
NF P18-545, article 10 : granulats pour béton

- Sulfates solubles dans l'eau (résidus de plâtre...)

Pour les usages NF EN 206+A2/CN

Nouveau

$V_{SS} 0,3\%$, 0,7% ou 1,3% (seuil actuellement en vigueur au niveau européen pour le marquage CE : 0,2%)

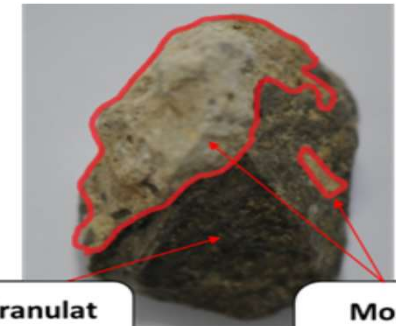
- Influence sur le temps de prise du ciment (écart maximum du temps de début prise en minutes)

Nouveau

- V_{SS10} , V_{SS20}

- V_{SS40} pour les bétons routiers

- Chlorures solubles dans l'eau des granulats recyclés pour béton → à déclarer



Granulat naturel

Mortier primaire accolé

RÈGLES D'UTILISATION DES GRANULATS RECYCLÉS DANS LES BÉTONS – NF EN 206+A2/CN

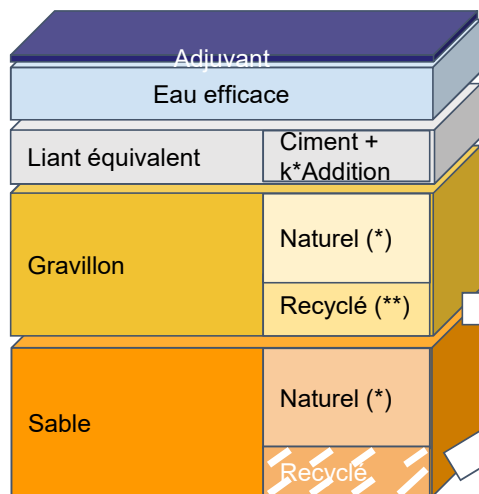
AFNOR P18B (présidence : F. Toutlemonde) :

Nouveau complément national (CN) de la norme Béton NF EN 206+A2/**CN** (en vigueur au 05/11/2022)

- Spécifications additionnelles aux normes granulats pour les sables et gravillons recyclés
- Proportions maximales par classe d'exposition
 - Evolution des règles
- *Nouveau* : Classes de substitution du béton

TAUX PAR CLASSE D'EXPOSITION

1m³ Béton



Exemple pour Gravier Type 1

Tableau NA.8a — Pourcentage massique maximum pour les gravillons recyclés de type 1 et le sable recyclé

	X0	XC1, XC2		XC3, XC4, XF1		XD1, XS1		XF2, XD2, XD3		XS2, XS3		XF3, XF4		XA
Gravier recyclé type 1	60	40	60	30	50	30	50	20	40	10	30	10 _a	30 ^a	0 ^b
Sable recyclé	30	10	20	10	20	10	20	10	15	10	15	0 ^b	15	0 ^b
Règles de formulation complémentaire		/	E_{ff}/Leq max abaissé de 0,05 _c	/	E_{ff}/Leq max abaissé de 0,05 _c	/	E_{ff}/Leq max abaissé de 0,05 _c	/	E_{ff}/Leq max abaissé de 0,05 _c	/	E_{ff}/Leq max abaissé de 0,05 _c	/	E_{ff}/Leq max abaissé de 0,05 _c	

^a Gravillons résistants au gel au sens de la norme NF P18-545.

^b A l'exception des granulats récupérés qui restent utilisables dans les conditions du 5.2.3.3 et NA.5.2.3.3.

^c Par rapport aux préconisations des tableaux NA F

NOTE Ces taux sont vérifiés en arrondissant le taux de substitution au pourcentage le plus proche.

(*) Pas de substitution de granulats légers par granulats recyclés
 (**) Pas de gravillon type 3 pour applications structurales

EXIGENCES POUR TOUS LES BETONS :

- Limitation de la quantité en sulfates solubles dans l'eau : %SO₄ solubles dans l'eau total granulats < ou = 0,2%
- Les granulats recyclés sont considérés comme « PR » (potentiellement réactifs) dans la norme Granulats NF P18-545 → Application des dispositions FD P 18-464: 2021 pour granulats PR.

Nouveautés 2022 vs 2014 :

- Le sable recyclé peut être utilisé sans limitation de classe mécanique du béton
- % gravillons recyclés type 1 et % sable recyclé plus élevés
- Toutes les classes d'exposition sont potentiellement concernées.

CLASSE DE TAUX DE SUBSTITUTION

Classes R0 à R7, en fonction du taux massique total de granulats recyclés & du type de gravillon (1 ou 2).

NB : la désignation normalisée n'est pas modifiée. Le taux et le type de gravillons sont indiqués sur le Bon de Livraison cf. NA7.3.

Taux massique total en granulats recyclés = (Msable recyclé + Mgravillon recyclé) / Mtotale granulats

Taux calculé à 0,01 près et vérifié 1/jour sur la base des bons de pesée des bétons (§NA 5.4.5).

Précision pour évaluation de la conformité : +/-0.02 (selon §NA.8.2.3, tableau NA 22).

Tableau NA 2 : Classes de taux de substitution de granulats recyclés dans le béton

Classe de taux de substitution	R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Plage de taux massique total (sable recyclé + gravillon Type 1) + Cas de béton avec sable recyclé sans gravillon recyclé.	0,01 - 0,05	0,06 - 0,15	0,16 - 0,25	0,26 - 0,40	0,41 - 0,55	0,56 - 0,70	0,71 - 0,85	0,86 - 1,00
Plage de taux massique total (sable recyclé + gravillon de type 2)	0,01 - 0,02	0,03 - 0,07	0,08 - 0,12	0,13 - 0,20	0,21 - 0,27	0,28 - 0,35	0,36 - 0,42	0,43 - 0,50

Règles particulières / Eurocode 2

Durabilité à justifier par approche performantielle

NOTE 1 Ce taux de substitution sert de base aux calculs de dimensionnement.

NOTE 2 La prescription peut s'effectuer soit en spécifiant la classe de taux de substitution en granulats recyclés et le type de gravillons recyclés, soit la plage de taux massique total de granulats recyclés et le type de gravillons recyclés.

NOTE 3 Pour les calculs d'impact environnementaux, le taux sera pris au milieu de la classe.

NOTE 4 Les classes R5 et au-delà ne peuvent être utilisées que via une approche performantielle selon le § NA 5.3.3.

NOTE 5 Pour les classes R2 et au-delà dans le cas de béton armé (R1 et au-delà pour le béton précontraint) l'attention du prescripteur est attirée sur la nécessité de prendre en compte la classe de taux de substitution de granulats recyclés dans le calcul du dimensionnement (voir NF EN 1992-1-1/NA/A1 et NF EN 1992-1-2/NA/A1).

EXEMPLE

Type de béton : **BPS NF EN 206/CN C25/30 XF1 D20 S3 CI 0.4**

Formule :

Sable : 850 kg = 765 kg (naturel) + 85 kg (recyclé)

Gravillon : 1000 kg = 700 kg (naturel) + 300 kg (recyclé, type 1)

Ciment CEM II/A 280 kg

Eau efficace : 160 kg

XC3, XC4, XF1	
30	50
10	20
/	E_{fl}/L_{eq} max abaissé de 0,05 c

Gravillon recyclé de **type 1** : **30 %**

Sable recyclé : **10 %**

Critères du Tableau NA.8a : Ok

Taux massique total en granulats recyclés

$$= (M_{\text{sable recyclé}} + M_{\text{gravillon recyclé}}) / M_{\text{totale granulats}}$$

$$= (85+300) / (850 + 1000) = \mathbf{0.21}$$

BPS NF EN 206/CN C25/30 XF1 D20 S3 CI0.4

Classe de taux de substitution	R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Plage de taux massique total (sable recyclé + gravillon Type 1)	0,01 - 0,05	0,06 - 0,15	0,16 - 0,25	0,26 - 0,40	0,41 - 0,55	0,56 - 0,70	0,71 - 0,85	0,86 - 1,00
Plage de taux massique total (sable recyclé + gravillons de type 2)	0,01 - 0,02	0,03 - 0,07	0,08 - 0,12	0,13 - 0,20	0,21 - 0,27	0,28 - 0,35	0,36 - ,42	0,43 - 0,50

A préciser sur le bon de livraison :

Classe R2
+ **Gravillon Type 1**

CALCUL DES STRUCTURES EN BÉTON DE GRANULATS RECYCLÉS – NORMES « EUROCODE 2 »

Trois documents normatifs pour encadrer le calcul des structures en béton de granulats recyclés :

- Aspects généraux du calcul : amendement A1 de l'Annexe Nationale de l'EC2-1-1 (NF EN 1992-1-1/NA /A1) : norme de la commission BNTRA CN EC2 « Calcul des structures en béton » (présidence : R.Coyere), parue en novembre 2022
- Calcul spécifique au feu : amendement A2 de l'Annexe Nationale de l'EC2-1-2 (NF EN 1992-1-2/NA/A2) : norme de la commission BNTRA CN EC2 « Calcul des structures en béton » parue en février 2023
- Calcul spécifique au séisme : essais spécifiques en cours, texte en réflexion au sein de la commission AFNOR CNPS, en lien avec BNTRA CN EC2, probablement un prochain FD de la commission AFNOR CNPS

CALCUL DES STRUCTURES EN BÉTON DE GRANULATS RECYCLÉS – NORMES « EUROCODE 2 »

Aspects techniques - Règles générales de calcul - Partie 1-1

- Proviennent en grande partie du projet national Recybéton
- Notions importantes :
 - Règles de calcul différentes entre structures en béton armé (BA) et structures en béton précontraint (BP) car les granulats recyclés (GR) ont un effet important sur la déformabilité et que la sensibilité n'est pas la même à ce sujet entre les structures BA et BP
 - Taux faibles en GR (jusqu'à 15 % pour gravillons type 1 en BA) : pas de modifications des propriétés du béton et donc des règles de calcul
 - Taux moyens en GR : formules de l'Eurocode 2 adaptées

exemple :

$$E_{cm} = 22 \alpha_{E_{cm}} \left(1 - \left(1 - \frac{0,73}{\alpha_{E_{cm}}} \right) \alpha_{RA} \right) \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$$

α_{Ra} : taux de substitution en granulats recyclés

ou essais spécifiques au projet à prévoir

CALCUL DES STRUCTURES EN BÉTON DE GRANULATS RECYCLÉS – NORMES « EUROCODE 2 »

Aspects techniques - Règles générales de calcul – Partie 1-1 (suite)

- Taux élevés en GR (au delà de 40 % pour gravillons de type 1 en BA) : essais spécifiques au projet à prévoir
→ Possiblement contraignant pour les projets avec des bétons à forts taux en GR (coûts et délais possiblement plus élevés) mais à ce jour, pas de retour d'expérience suffisant pour donner des formules générales de calcul pour les forts taux

Aspects techniques - Règles de calcul au feu – Partie 1-2

- Proviens des essais et réflexions dans le cadre de Recybéton mais aussi d'essais spécifiques complémentaires de la Filière Béton
- Taux très faible en GR (en dessous de 5 % pour BA avec gravillons de type 1) : rien n'est modifié par rapports aux bétons avec granulats naturels
- A partir de taux faibles (à partir de 15 % pour BA avec gravillons de type 1) : essais spécifiques à l'écaillage à prévoir ou mise en œuvre de fibres polypropylènes (2 kg/m³)

CALCUL DES STRUCTURES EN BÉTON DE GRANULATS RECYCLÉS – NORMES « EUROCODE 2 »

Aspects techniques - Règles de calcul au feu (suite)

- En termes de propriétés thermomécaniques :
 - taux faibles et moyens (entre 5 % et 25 % pour BA avec gravillons de type 1) : utilisation de l'Eurocode 2 partie « feu » des bétons avec granulats naturels
 - taux forts (au delà de 25 % pour BA avec gravillons de type 1) : essais de caractérisation spécifiques à prévoir

→ Possiblement contraignant pour les projets avec des bétons à forts taux en GR (coûts et délais possiblement plus élevés) mais à ce jour, pas de retour d'expérience suffisant pour donner des règles générales pour ces taux

→ Mise en évidence d'une sensibilité particulière des bétons de GR par rapport à l'écaillage (sur les essais réalisés à ce jour)

CONCLUSIONS

- A ce jour, corpus normatif complet (mis à part calcul sismique à venir prochainement) pour encadrer la réalisation de projets d'ouvrages ou de bâtiment en béton de granulats recyclés
 - concours de plusieurs Bureaux de Normalisation (AFNOR, BNTRA)
- Normes rédigées sur un retour d'expérience important d'essais sur les taux faibles ou moyens (moins de 40 % de GR)
- Retour d'expérience sur les taux importants à étoffer, en complément de Recybéton
- Or on constate volonté forte des MOA d'utiliser ces bétons et souvent avec des taux très élevés (jusqu'à 100 %)
- Pour les forts taux, les normes de calcul demandent des essais spécifiques qui augmentent coûts et délais mais cela est bien possible et encadré normativement
- Révision de ces normes sera toujours possible lorsque davantage de retour d'expérience sera constitué
- Une démarche clé pour la résilience des territoires :
 - Economie de ressources naturelles, réduction de la perturbation du paysage et des habitats naturels, limitation des atteintes à la biodiversité,
 - Valorisation économique de ressources qui seraient sinon éliminées en tant que déchets

Une définition de la résilience : "un peuplement est résilient s'il sait et peut trouver les capacités nécessaires pour son adaptation face à des aléas qui le menacent" (source : site internet Cerema)



Merci pour votre attention



BUREAU de NORMALISATION
des TRANSPORTS, des ROUTES
et de leurs AMÉNAGEMENTS
par délégation d'AFNOR