

Conférence Technique Territoriale
Sobriété, frugalité et réemploi

Le 09/02/2023, à Metz

**Le recyclage du béton dans le béton:
apport de la recherche**

Amor BEN FRAJ

Directeur de Recherche/ UMR MCD

amor.ben-fraj@cerema.fr

Plan de la présentation

- Contexte environnemental/ normatif
- Les bétons à base de GR (BGR)
- Ouvrages à base de BGR
- Evolutions normatives

Environnemental
Normatif

Emergence des enjeux environnementaux du développement durable

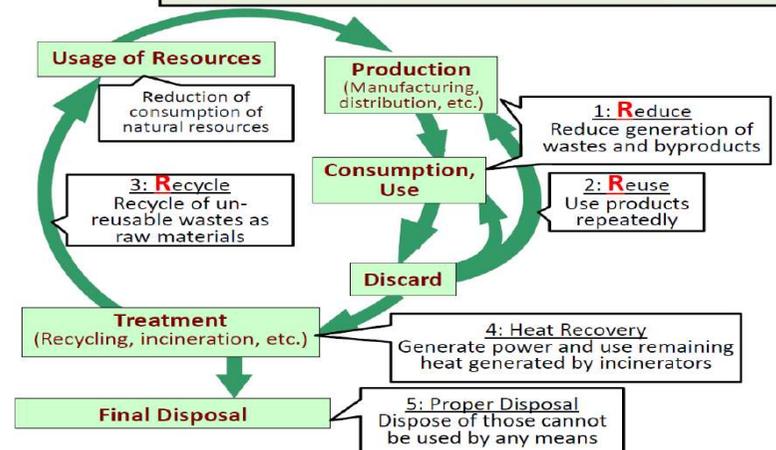
Quantités importantes d'émissions de CO₂

Epuisement des ressources naturelles

Développement d'une économie circulaire

1. What does "Sound Material-Cycle Society" mean?

A: Closed-loop system for waste management



Formulation of the Basic Plan for Establishing a Sound Material-Cycle Society

L'économie circulaire et le concept de 3R (CGDD, 2014)

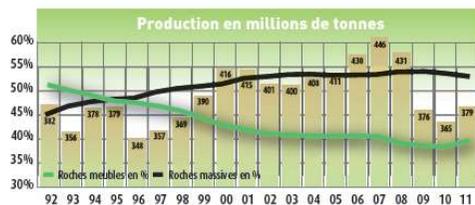
Miyas, Osaka, Honda

- ❑ Les déchets du secteur de la construction sont de **1 billion de tonnes/ année**, en Europe: le **1/3 du total des déchets** produits
- ❑ Une demande croissante des matériaux de construction, avec une disparité entre les pays/ régions
- ❑ La directive européenne **2008/98/CE**: Objectif de **valorisation à 70% en 2020**
- ❑ La **loi TECV** en France

Les granulats en France (Unicem, 2010)

Production nationale de granulats

(en millions de tonnes)	2010	2011	% 2011/10	Structure en %
Roches meubles	141	149	+5,7	39,3
Alluvionnaires	114	119	+4,4	31,4
Granulats marins	6	7	+16,7	1,8
Autres sables	21	23	+9,5	6,1
Roches massives	201	205	+2,0	54,1
Roches calcaires	95	100	+5,3	26,4
Roches éruptives	106	105	-0,9	27,7
Recyclage	23	25	+8,7	6,6
Matériaux de démolition	17	19		
Schistes	2	2		
Laitiers	2	2		
Mâchefers (MIOM)	2	2		
Total	365	379	+3,8	100



Productions régionales de granulats

(en millions de tonnes)	Roches meubles	Roches massives	Granulats de recyclage	Total	% 2011/2010
Rhône-Alpes	26,7	11,4	3,4	41,5	+4,8
Pays de la Loire	10,4	27,9		38,3	+1,6
PACA	8,4	19,1		27,5	+5,0
Bretagne	2,8	21,8	0,2	24,8	-1,2
Midi-Pyrénées	12,4	10,6		23,0	+1,8
Poitou-Charentes	6,0	16,3		22,3	+8,3
Aquitaine	11,3	10,0		21,3	+3,9
Alsace	16,0	1,1	1,6	18,7	+2,7
Languedoc-Roussillon	3,1	15,3		18,4	+7,0
Nord - Pas-de-Calais	0,8	11,6	4,3	16,7	+5,0
Lorraine	5,9	7,4	2,6	15,9	+8,2
Île-de-France	8,5	1,8	4,8	15,1	+11,9
Basse-Normandie	2,0	12,2		14,2	+0,7
Centre	6,2	7,1		13,3	+8,1
Bourgogne	3,5	9,1		12,6	0
Franche-Comté	1,7	9,9		11,6	-2,5
Champagne-Ardenne	5,1	5,3		10,4	+7,2
Auvergne	2,4	7,8		10,2	-3,8
Haute-Normandie	8,1	0,9		9,0	+8,4
Picardie	5,9	1,1		7,0	+1,4
Limousin	0,4	3,9		4,3	-8,5
Corse	1,2	1,2		2,4	-4,0

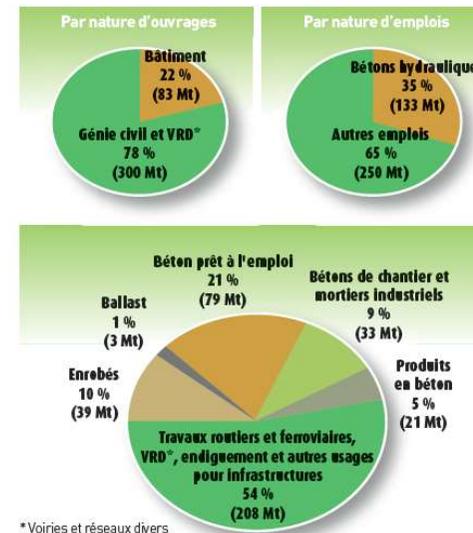
Commerce extérieur

	(en millions de tonnes)
Exportations	7
(Suisse, Allemagne, Pays-Bas, Belgique, Royaume-Uni,... *)	
Importations	11
(Belgique, Espagne, Allemagne, Royaume-Uni, Norvège,... *)	

* classés par ordre décroissant d'importance

Consommation

383 millions de tonnes



* Voiries et réseaux divers

Les granulats en Île-de-France (Unicem, 2010)

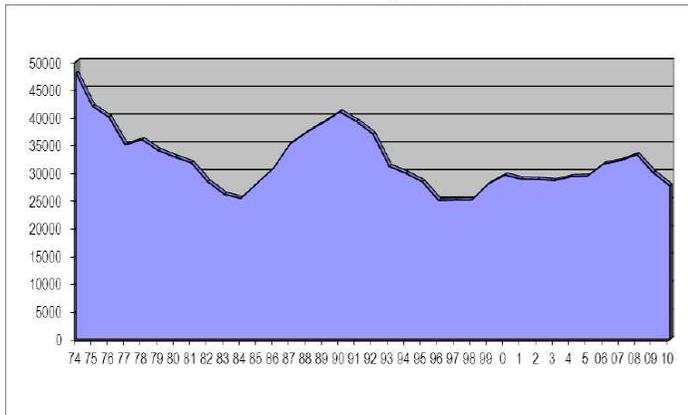
**Environnemental
Normatif**

Production régionale de granulats (milliers de tonnes)

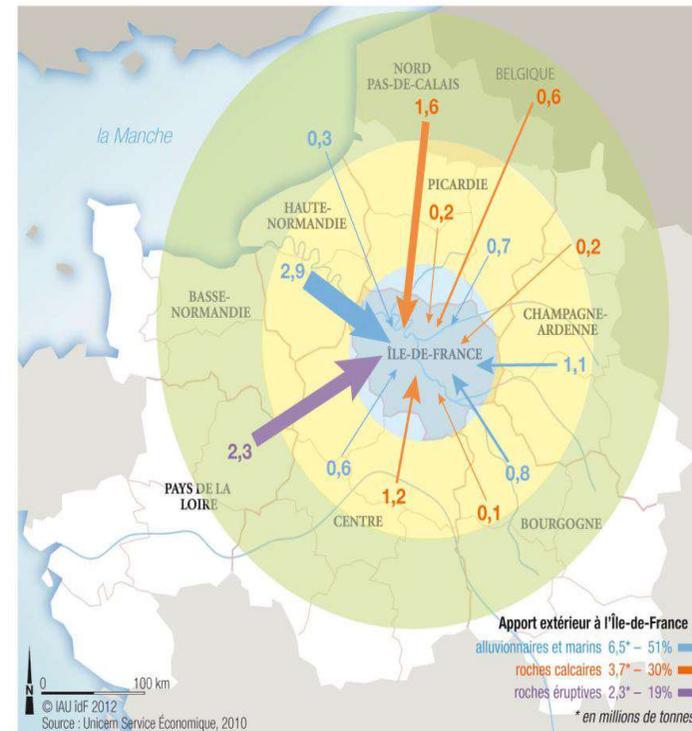
	2007	2008	2009
Granulats naturels			
Alluvionnaires	7 842	7 389	6 335
Sablons	3 084	2 706	1 800
Calcaires	1 710	1 714	1 466
Granulats recyclés			
Produits de démolition	4 120	4 150	4 000
MIOM	790	798	750
Enrobés	400	372	430
Total	17 946	17 129	14 781

Sources : Dree, UNICEM 2009

Evolution de la consommation francilienne de granulats 1974-2010



Source : Unicem 2010



Les trois cercles d'approvisionnement

- 1^{er} cercle** Région Ile-de-France
- 2^e cercle** Haute-Normandie, Picardie, Champagne, Yonne, Centre
- 3^e cercle** Nord-Pas-de-Calais, Belgique, Champagne, Grand Ouest

I- Les bétons à base de granulats recyclés

Environnemental
Normatif

Anciens seuils en France (EN 206/CN, 2014)

Type de granulat recyclé	Classe d'exposition			
	XC0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XD1, XS1	Autres
Gravillon de type 1	60	30	20	0 ^a
Gravillon de type 2	40	15 ^a	0 ^a	0 ^a
Gravillon de type 3	30	5	0	0
Sable	30	0	0	0

^a Pour les bétons de chaussées, un taux de substitution de 20 % est autorisé pour les gravillons provenant de la déconstruction des couches de base et de roulement des chaussées routières ou aéroportuaires et dont la traçabilité est assurée.



Le fascicule N°65 renvoie aux normes NF EN 206/CN et EN 13369 + spécifications sur les GR

GR de **type 1**;
Déconstruction d'**ouvrages d'art + traçabilité**;
Taux < 20%
C35/45 + XC1, XC2, XC3, XC4 et XF1

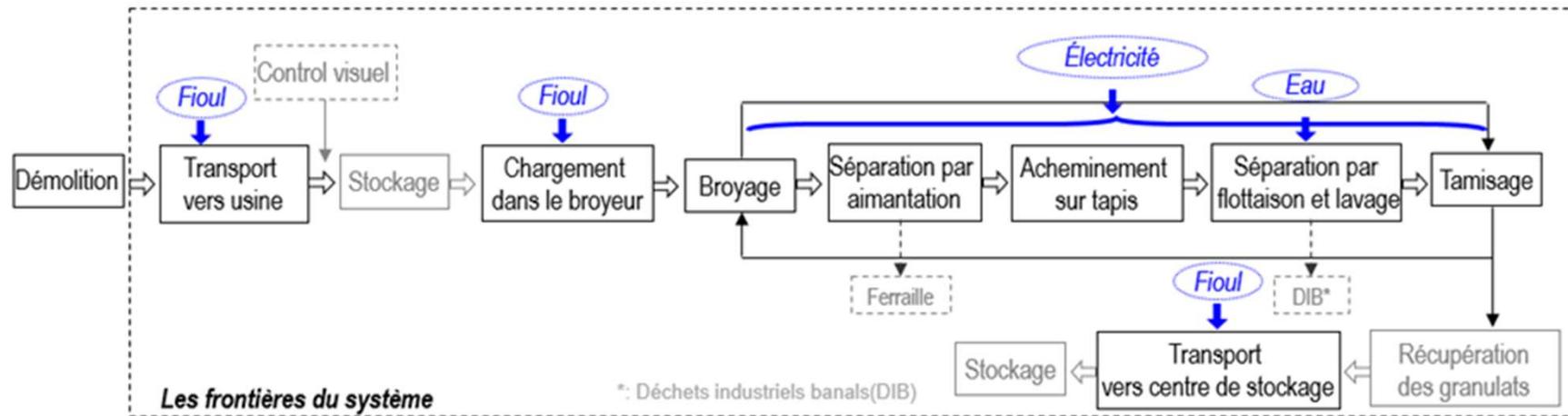
Besoin de Recherche

- Les interactions entre les GR et la matrice cimentaire;
- Les phénomènes mécaniques, physiques et chimiques mis en jeu lorsque le matériau est sollicité

I- Les bétons à base de granulats recyclés

A- Production des granulats recyclés (GR)

BO
BHP

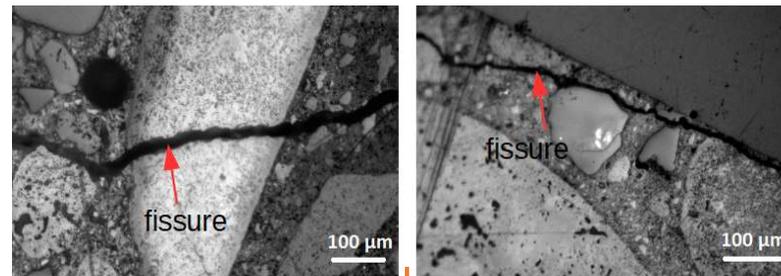


I- Les bétons à base de granulats recyclés

B- Caractérisation des GR

BO
BHP

Granulats	Masse volumique (kg/m ³) NF EN 1097-6	Absorption d'eau (%) NF EN 1097-6	Los Angeles (%) NF EN 1097-2	Micro Deval (%) NF EN 1097-1
Sable Naturel	2650	0,97	-	-
Gravillon 4/12	2660	0,70	23	16
Gravier 12/20	2680	0,60	22	11
GR_4/12	2180	6,71	32	36
GR_12/20	2170	6,80	35	27



Les GR ont une **faible densité**:
faible densité et forte porosité du
mortier adhérent

Les GR ont une **absorption d'eau
élevée**: forte porosité du mortier
adhérent

Les GR ont une **faible résistance**
à la **fragmentation** (Los Angeles)
et à l'**usure** (Micro Deval)

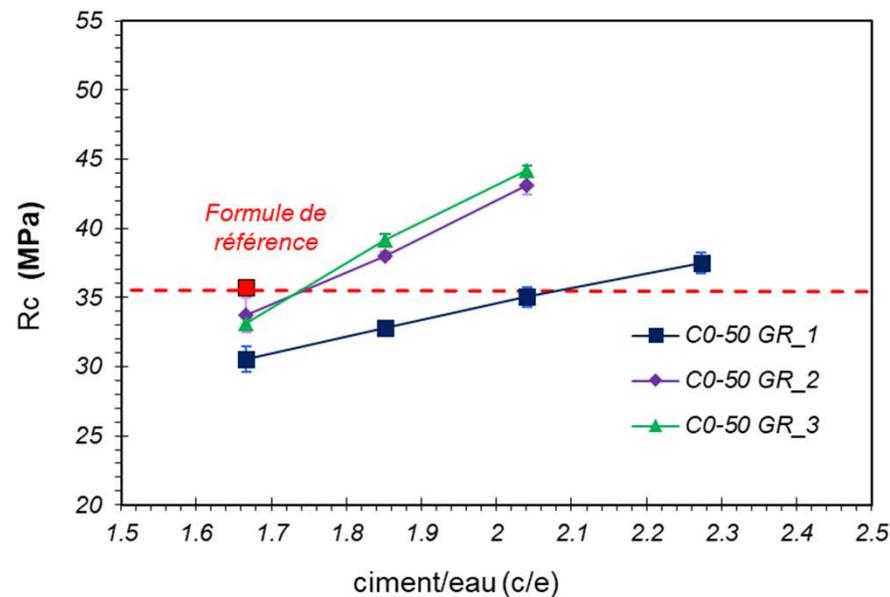
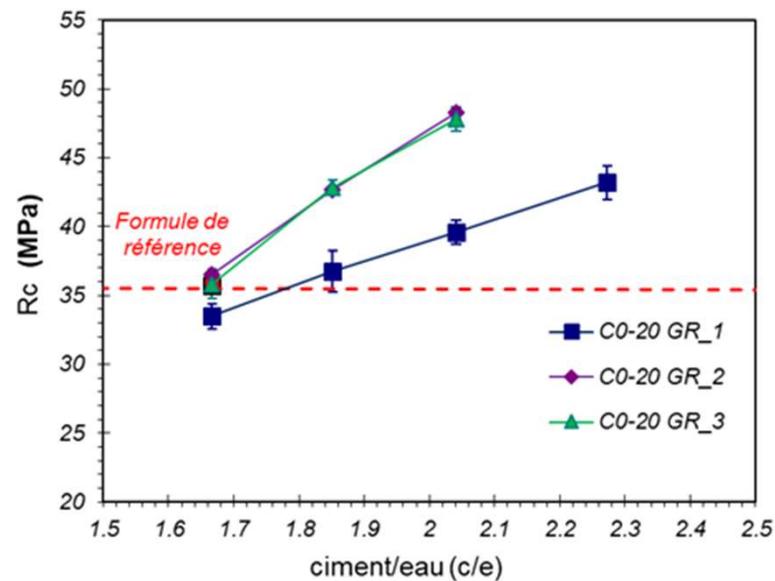
I- Les bétons à base de granulats recyclés

C- Valorisation des GR dans les BO

BO
BHP

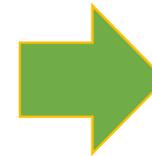
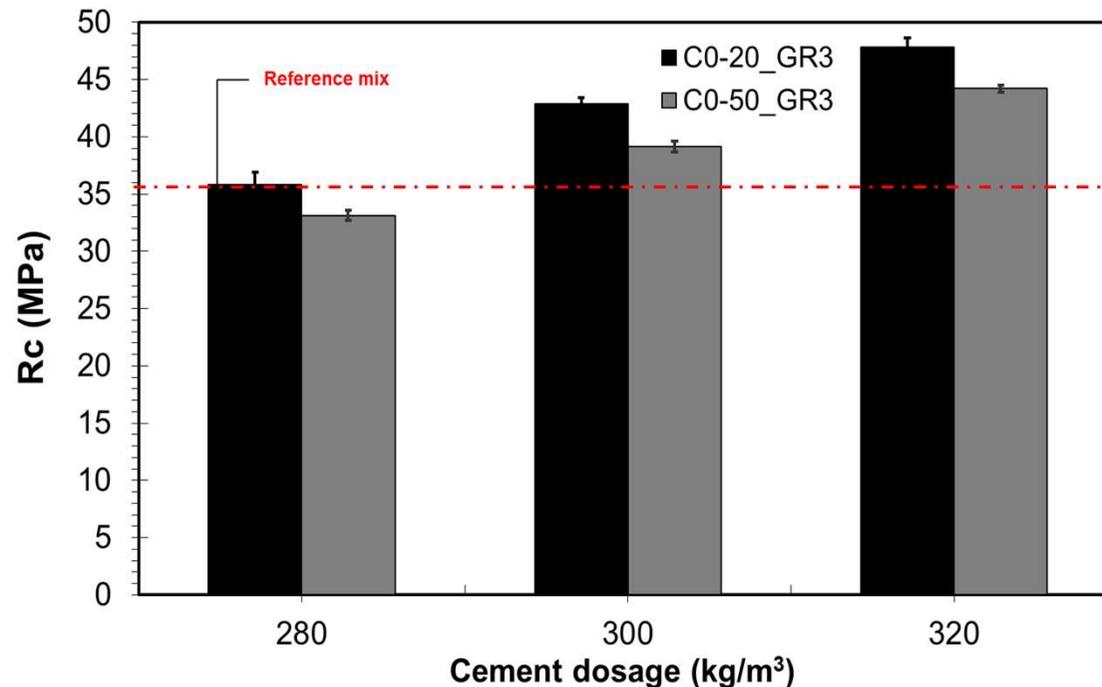
	CEM II	0/4 N	4/12 N	12/20 N	4/12 R	12/20 R	Eeff	SP
BGN	280	904	434	563	-	-	168	3
BGR_1	280	904	80, 50 et 0% vol.		20, 50 et 100% vol.		168	3
BGR_2	280	904	80 et 50% vol.		20 et 50% vol.		168	3
BGR_3	280	904	80 et 50% vol.		20 et 50% vol.		168	3

GR1 → Rcu70 (TP)
GR2 → Rcu99 (béton)
GR3 → Rcu99 (béton)



I- Les bétons à base de granulats recyclés

C- Valorisation des GR dans les BO

BO
BHP

GR1 à 20% → + 5% de ciment

GR2/3 à 20% → + 0% de ciment

GR1 à 50% → + 16% de ciment

GR2 à 50% → + 3,2% de ciment

GR3 à 50% → + 3,1% de ciment

GR1 à 100% → + 36% de ciment



Le tri, c'est la clé d'une valorisation réussie

I- Les bétons à base de granulats recyclés

D- Valorisation des GR dans les BHP - Retrait

BO
BHP

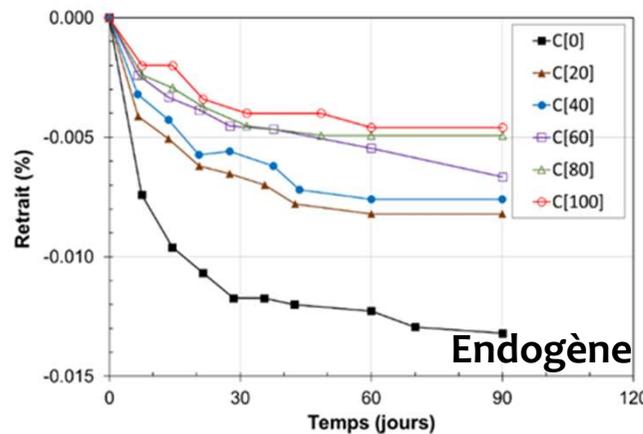
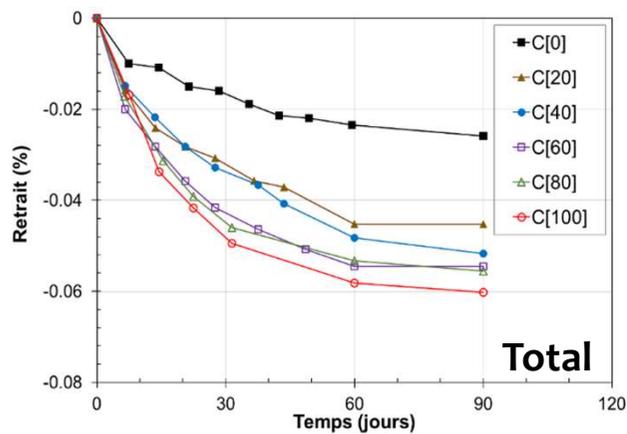
Bétons	C[0]	C[20]	C[40]	C[60]	C[80]	C[100]
Taux de substitution	0	20	40	60	80	100
Ciment	380					
Sable	867,8					
GN 4/12	432	345,6	259,20	172,80	86,40	0
GR 4/12	0	77,02	154,03	231,05	308,52	385,08
GN 12/20	561,2	448,96	336,72	224,48	112,24	0
GR 12/20	0	99,63	199,26	298,89	398,52	498,14
SP	1,5					
E/C effectif	0,42					

Un C60

XC4

S4

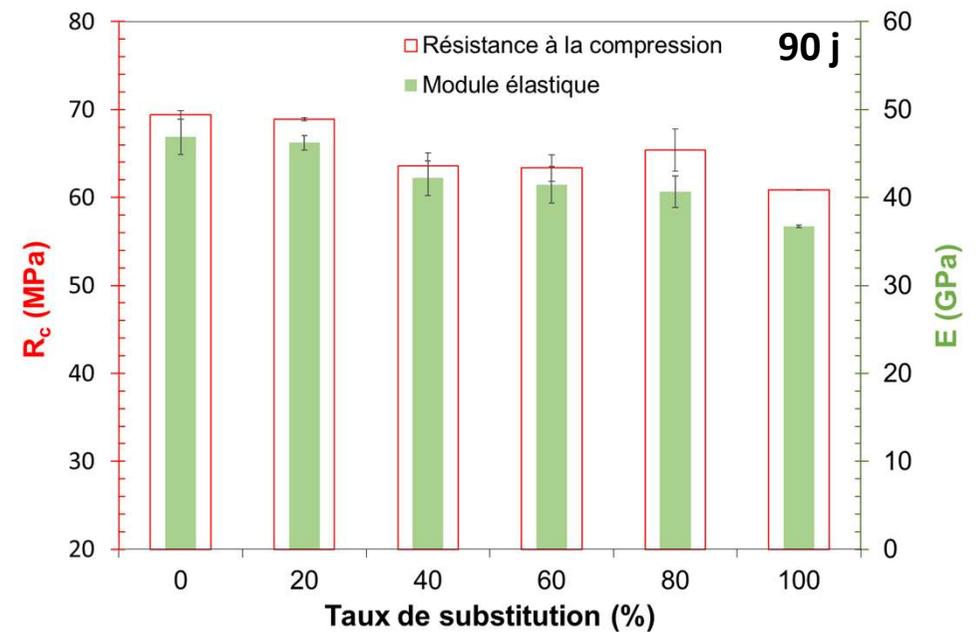
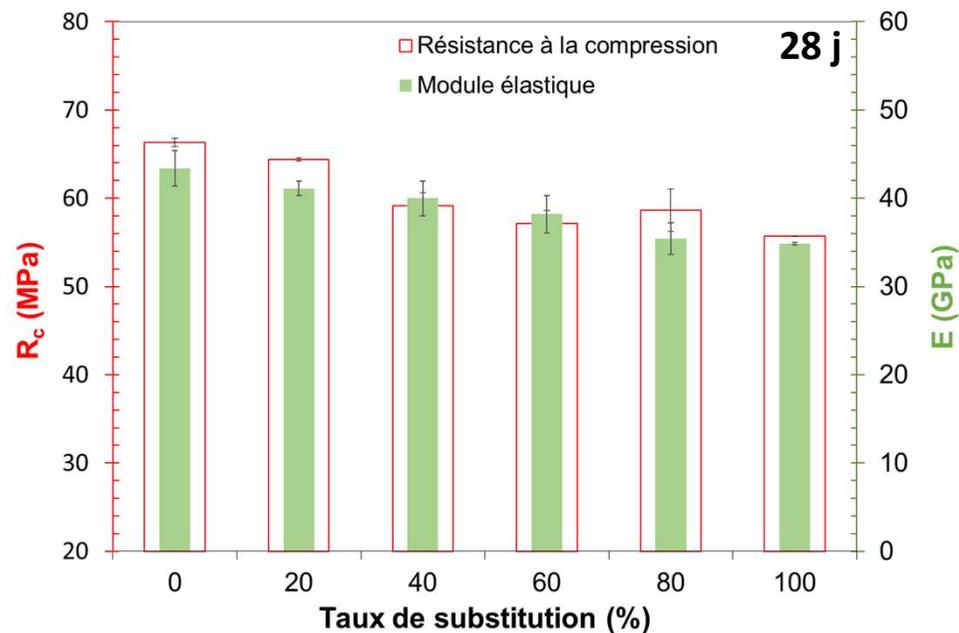
GR saturés 24h avant la fabrication



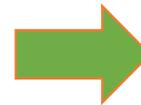
Les GR améliorent la cure interne du béton et diminuent ainsi le retrait endogène: « réservoir d'eau »

I- Les bétons à base de granulats recyclés

D- Valorisation des GR dans les BHP – Propriétés mécaniques

BO
BHP

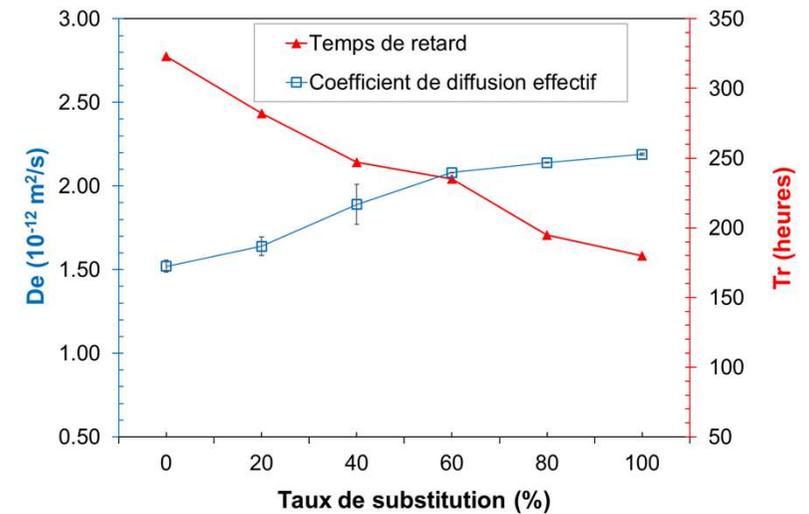
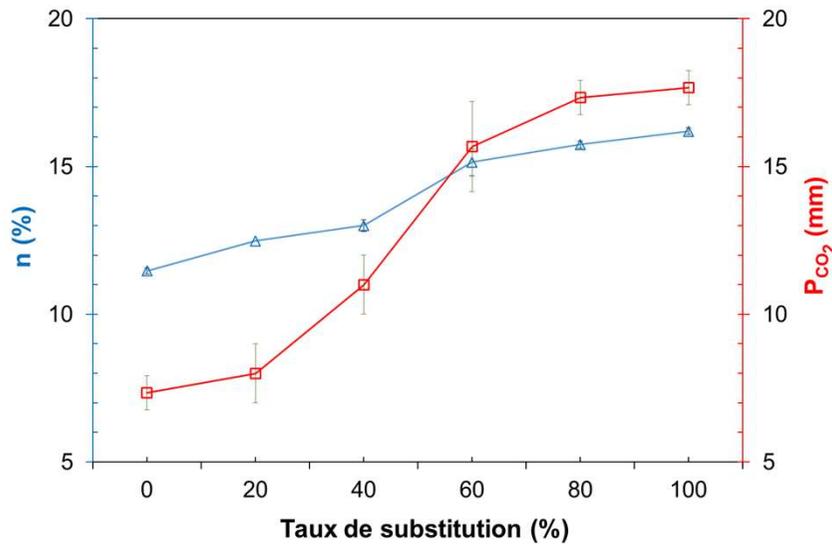
☐ + GR → une baisse de Rc et E



☐ Microfissures des GR
☐ Multitude d'ITZ

I- Les bétons à base de granulats recyclés
 E- Valorisation des GR dans les BHP - Durabilité

**BO
 BHP**



Porosité des GR → + [CO₂] et + [Cl⁻]

F- Valorisation des GR dans les BHP – E/C

BGR	F _{c28} (MPa)	E ₂₈ (GPa)	ε (%)	De (m ² /s)	CO ₂ (cm)
C[60]	0,39	-	-	0,38	0,36
C[100]	0,38	-	-	0,37	0,35

II- Les bétons à base de ciments recyclés



BO
BHP

Tab: Approche performantielle appliquée aux bétons à base de ciments recyclés

Concrete class	Label	Performance approach			Durability rank
		Water accessible porosity – n	Apparent migration coefficient – $D_{app(mig)}$	Apparent gas permeability - K_a	
C60 concrete	C_CEM I-T2f	HD	HD<>VHD	HD	HD
	C_CEM I-T1c	HD	HD<>VHD	HD	HD
	C_CEM I-T2c	HD	HD<>VHD	HD	HD
C30 concrete	C_CEM II-T1f	LD<>MD	HD	HD	LD<>MD
	C_CEM II-T1c	LD<>MD	HD	HD	LD<>MD

LD: Low Durability; HD: High Durability; VHD: Very High Durability

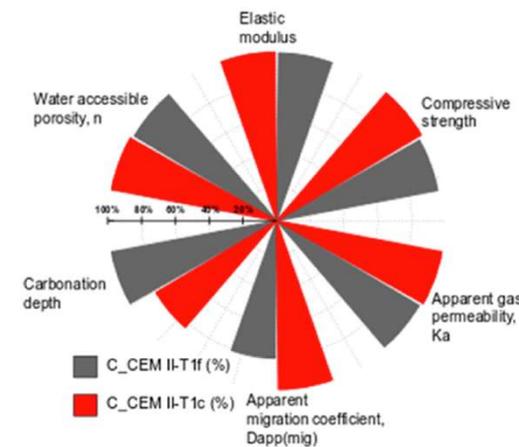
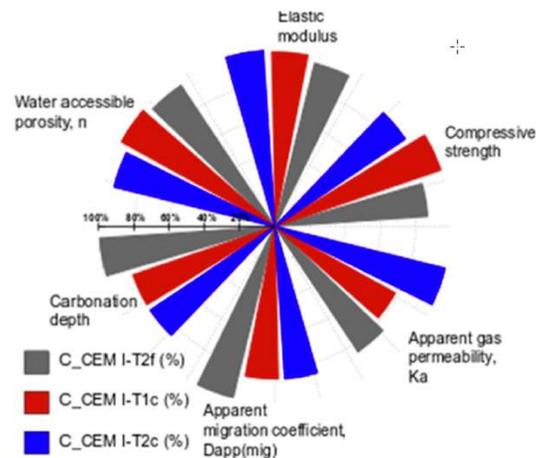


Fig. Comparaison des propriétés des bétons de référence, à base de CEM I (gauche) et CEM II (droite), avec et sans fines recyclées

A retenir:

- ❑ Un **bon tri** est un **gage de qualité** des GR → **meilleure valorisation**
- ❑ GR de **bonne qualité** → une **légère baisse de E/C** suffirait à compenser la baisse de F_c → **béton moins coûteux**
- ❑ 20-40% GR dans BHP → (-) de **retrait endogène**, une légère **baisse de F_c** , **affecte** surtout le **module élastique**: forte porosité et **caractère endommagé des GR**
- ❑ Pour compenser F_c et durabilité par **baisse de E/C**, la **résistance** ne semble **pas** être la **propriété à contrôler** → **modulation de l'enrobage?**

1. Une classothèque à base de béton recyclé

Classothèque de Mitry-Mory:

- Bâtiment soumis au code du travail, mais pas ERP;
- 40 m³ de béton;
- **Une surcharge de 750 kg/m²**

Caractéristiques du béton:

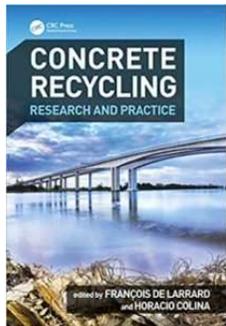
- 30% de sable recyclé;
- 50% de gravillons recyclés;
- **Un C25**



2. Mur en préfabriqué à base de béton recyclé



Bétons ordinaires (usage bâtiment)



L'approche performantielle: FD P 18-480

Possibilité d'intégrer plus de GR dans les bétons pour OA?

Nouveaux seuils pour les GR de type 1 (NF EN 206/CN, 2022)

	X0	XC1, XC2		XC3, XC4, XF1		XD1, XS1		XF2, XD2, XD3		XS2, XS3		XF3, XF4*		XA
Gravillon recyclé type 1	60	40	60	30	50	30	50	20	40	10	30	10	30	5***
Sable recyclé**	30	10	20	10	20	10	20	10	15	10	15	5***	15	5***
Règles de formulation complémentaires	/	E _{eff} /Leq max abaissé de 0,05		/ E _{eff} /Leq max abaissé de 0,05		/ E _{eff} /Leq max abaissé de 0,05		/ E _{eff} /Leq max abaissé de 0,05		/ E _{eff} /Leq max abaissé de 0,05		/ E _{eff} /Leq max abaissé de 0,05		

Nouveaux seuils pour les GR de type 2 (NF EN 206/CN, 2022)

	X0	XC1, XC2		XC3, XC4, XF1		XD1, XS1		XF2, XD2, XD3		XS2, XS3		XF3, XF4*		XA
Gravillon recyclé type 2	40	20	30	15	25	15	25	10	20	5	15	5	15	0
Sable recyclé**	15	5	10	5	10	5	10	5	5	5***	5	5***	5	5***
Règles de formulation complémentaires	/	E _{eff} /Leq max abaissé de 0,05		/ E _{eff} /Leq max abaissé de 0,05		/ E _{eff} /Leq max abaissé de 0,05		/ E _{eff} /Leq max abaissé de 0,05		/ E _{eff} /Leq max abaissé de 0,05		/ E _{eff} /Leq max abaissé de 0,05		

* granulats non gélifs

** sable recyclé présentant une absorption d'eau inférieure à 10%

Conférence Technique Territoriale
Sobriété, frugalité et réemploi

Le 09/02/2023, à Metz

Merci pour votre attention

Amor BEN FRAJ

Directeur de Recherche/ UMR MCD

amor.ben-fraj@cerema.fr

Mes remerciements à mes co-auteurs:

R. Idir, A. Adessina, J-F. Barthélémy, S. Decreuse