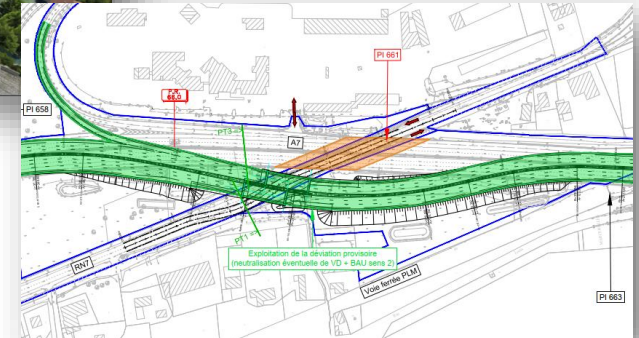
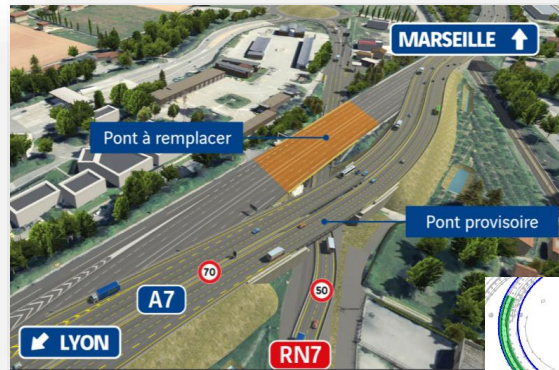
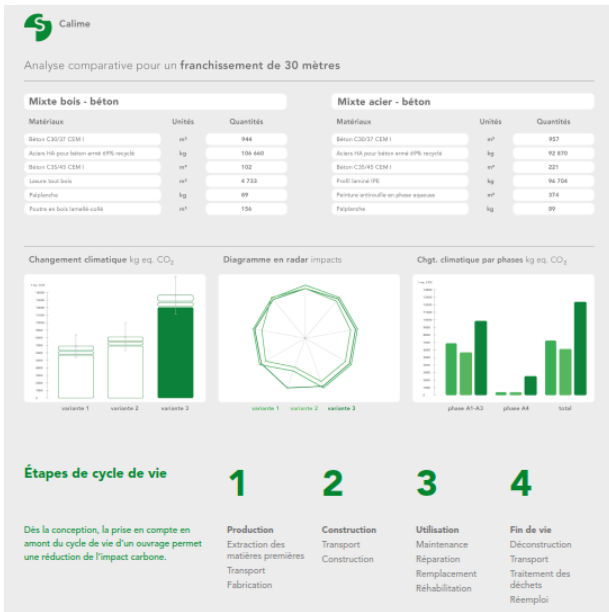


La construction bas carbone : Le retour d'expérience d'un exemple concret : opération PI661

Journée AFGC 31/03/2022



setec



Démarche globale

Engagements – Chartes / Manifeste / Guide bas carbone / Outils

Engineers Declare



Charte de l'ingénierie pour le Climat – Syntec ingénierie



Manifeste



Guide



Outils

Calime

CALculateur d'Impact Environnementaux

Analyse comparative pour un franchissement de 30 mètres

Mixte bois - béton			Mixte acier - béton		
Matériaux	Unités	Quantités	Matériaux	Unités	Quantités
Béton C30/37 CEM I	m ³	944	Béton C30/37 CEM I	m ³	957
Acier IPE pour béton armé 40% recyclé	kg	106 460	Acier IPE pour béton armé 40% recyclé	kg	92 870
Béton C30/45 CEM I	m ³	102	Béton C30/45 CEM I	m ³	221
Lacune bois lamé	m ³	4 733	Poutre lamellé-croisé	kg	94 706
Papier peint	kg	89	Peinture extérieure en phase apparente	m ²	374
Placote en bois vernie laquée	m ²	150	Papier peint	kg	99

Changement climatique kg eq. CO₂

Diagramme en radar impacts

Chgt. climatique par phases kg eq. CO₂

Étapes de cycle de vie

- 1 Dès la conception, la prise en compte en amont du cycle de vie d'un ouvrage permet une réduction de l'impact carbone.
- 2 Production
Extraction des matières premières
Transport
Fabrication
- 3 Construction
Transport
Construction
- 4 Utilisation
Maintenance
Réparation
Remplacement
Réhabilitation

Fin de vie
Démolition
Transport
Traitement des déchets
Remploi

... depuis les premiers engagements en Octobre 2019 jusqu'à la mise en place d'outils et d'un guide à la mi-2021.

Recherche de **réduction de l'impact carbone** d'une opération OA

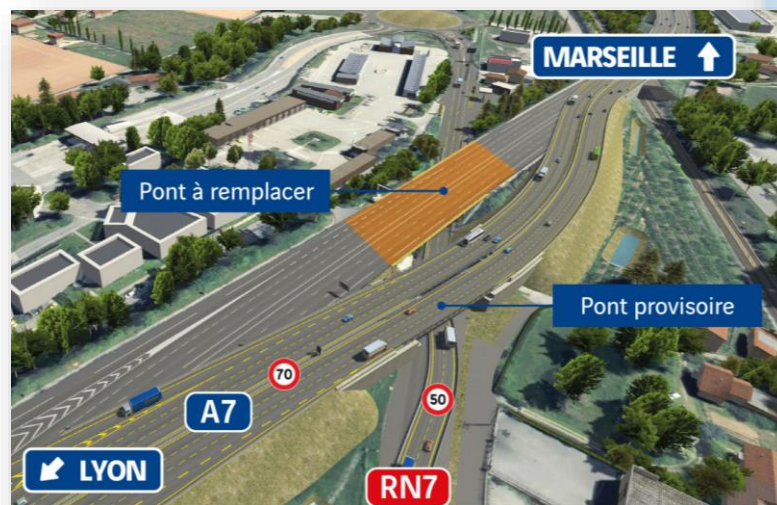
Démolition/reconstruction du PI661 à Bourg-Lès-Valence

Démolition/reconstruction du PI661 à Bourg-Lès-Valence

Présentation de l'opération



setec



2021	2022	2023	2024
------	------	------	------



Été 2021

Automne 2021 >
Printemps 2022

Printemps 2022 >
Automne 2023

Automne 2023 >
Printemps 2024

Source images/infographie: Vinci Autoroutes



Démolition/reconstruction du PI661 à Bourg-Lès-Valence

Présentation de l'opération



Agir pour le climat, vers l'**autoroute bas carbone**



Favoriser l'**économie circulaire**, vers l'autoroute recyclée « **zéro déchet** »



Préserver les milieux naturels, vers la **renaturation du domaine autoroutier**

Source images/infographie: Vinci Autoroutes (<https://www.a7-remplacement-pont.fr/>)



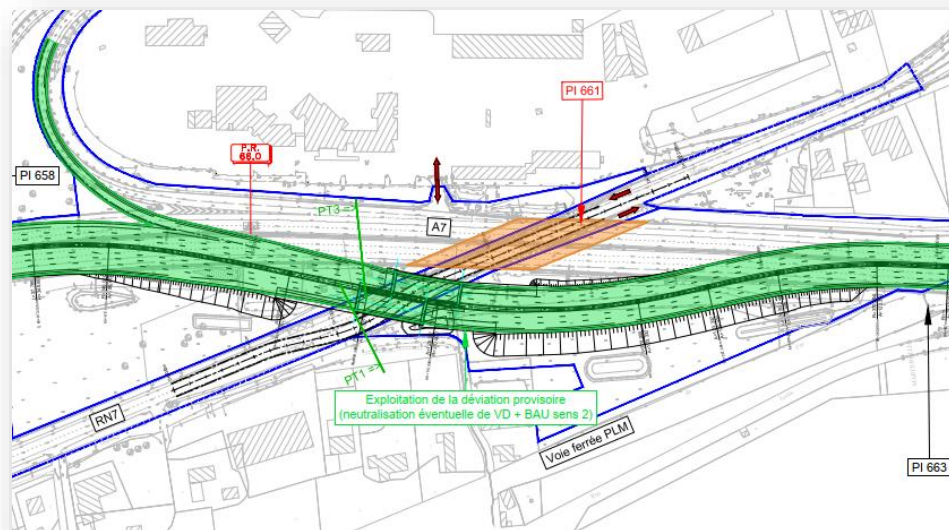
Démolition/reconstruction du PI661 à Bourg-Lès-Valence



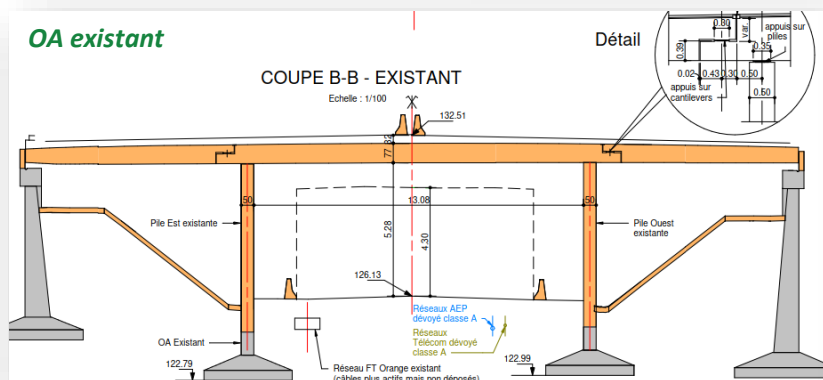
setec

Présentation de l'ouvrage

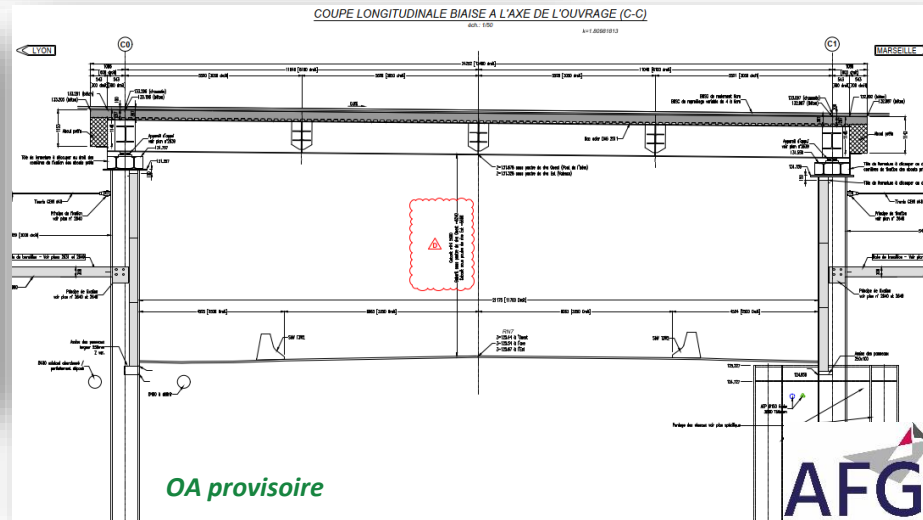
Vue en plan de la déviation



OA existant



COUPE LONGITUDINALE BIAISE A L'AXE DE L'OUVRAGE (C-C)

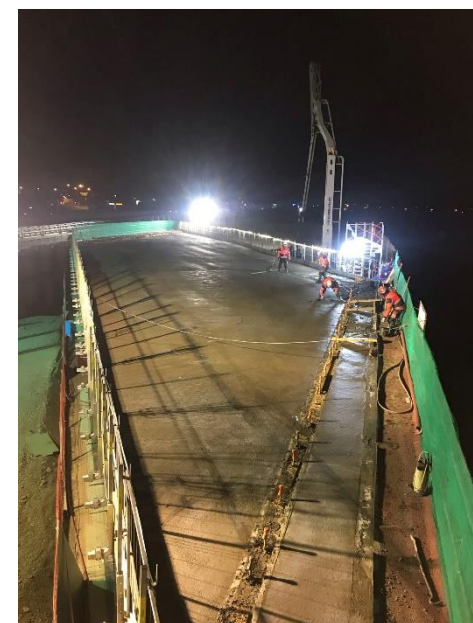
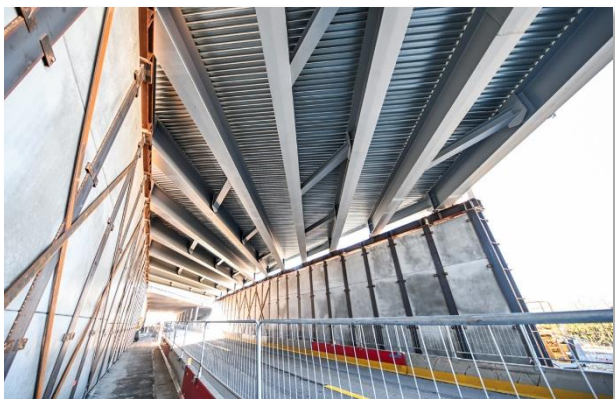
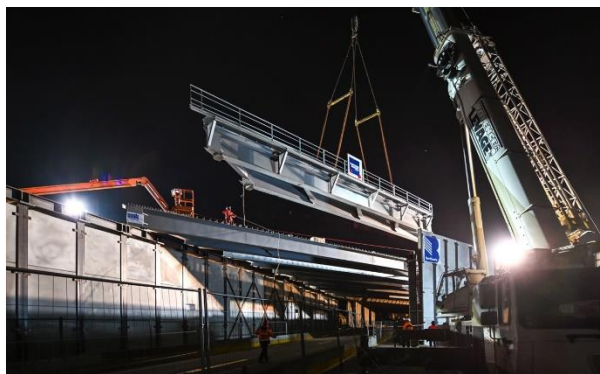


OA provisoire



Démolition/reconstruction du PI661 à Bourg-Lès-Valence

Images de la construction de l'ouvrage provisoire



Crédit photos : Vinci Autoroutes et setec ALS



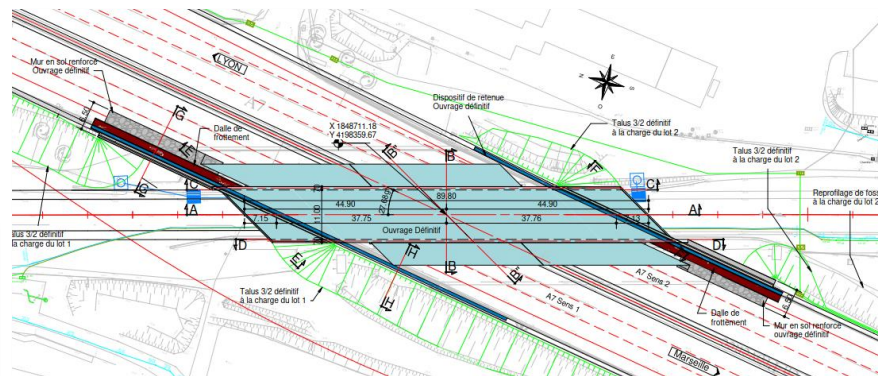
Démolition/reconstruction du PI661 à Bourg-Lès-Valence



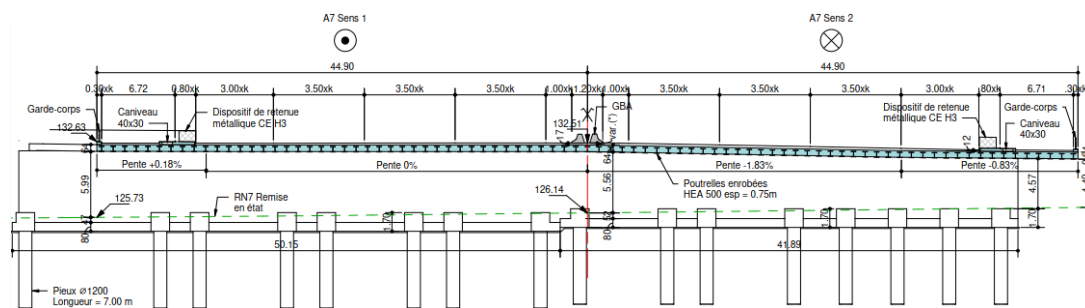
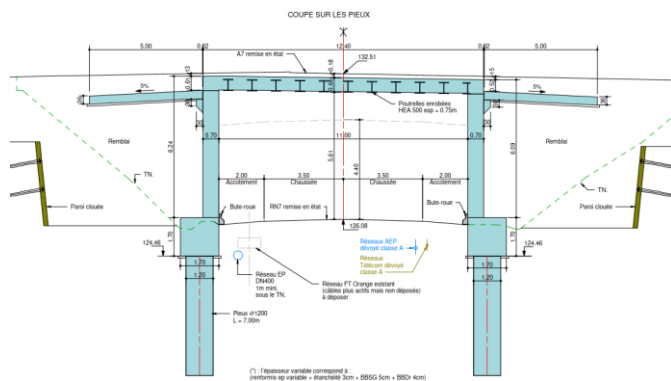
Présentation de l'ouvrage neuf

OA neuf particularités :

- OA très biais
- Très large (~90m)
- Contrainte gabarit importante (4,40m)



BESOINS	Remblais (y.c. QAV)	m3 de remblais
	total :	14 210
	Béton armé OA définitif (y.c. QAV)	m3 de béton
	total :	2 890
	Armatures (y.c. QAV)	kg d'armatures**
	total :	361 400
Charpente métallique (y.c. QAV)	kg d'acier	
total :	223 370	



Démolition/reconstruction du PI661 à Bourg-Lès-Valence



setec

Contexte – attentes du client

Au stade du DCE, demande d'ASF de « **Décarboner** » l'opération (Mars 2021)

- Sur le Lot 2 – Démolition OA existant + Construction OA définitif
- Concerne les **GES** « uniquement »
- A traduire dans le marché par des **prescriptions** incitant les entreprises à une réflexion poussée sur le sujet et à s'engager à tenir des **objectifs dès leurs offres**.

→ Réalisation d'une **Note de cadrage**

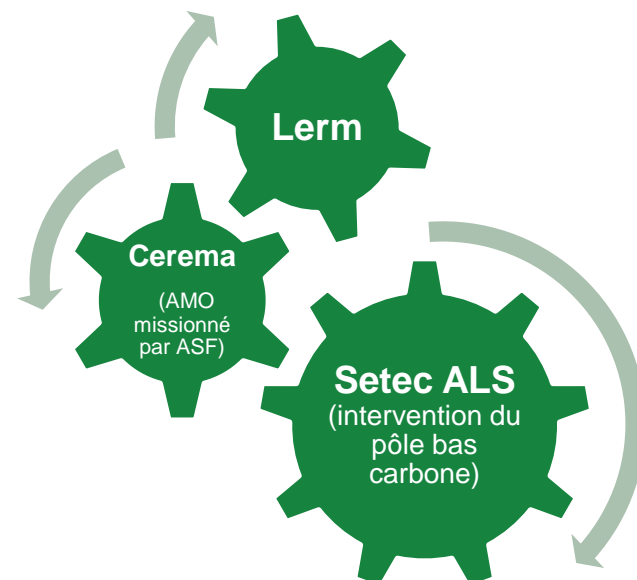
→ Identification des principaux postes d'émission

→ Mais aussi recherche des pistes :

→ Pour **l'économie circulaire**

→ Pour la valorisation des **filières locales**

→ Recherche des **leviers d'action**



Axes retenus :

- Bétons bas carbone → **approche performantielle**
- Recyclage des produits de démolition
- Inscription dans le contexte local



Association Française de Génie Civil

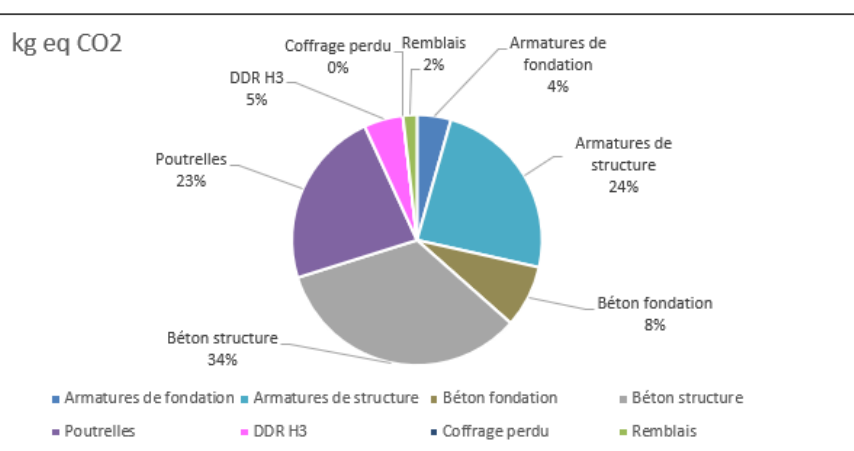
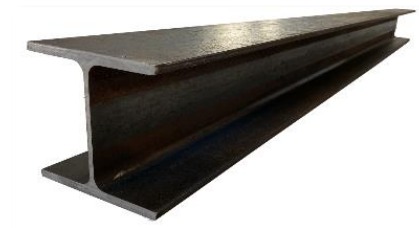


Figure 11 – Evaluation de l'impact environnemental de la construction du PI661 sur l'indicateur de réchauffement climatique en tonnes de CO₂ équivalents (Source : éco-comparateur Setec)

Solutions envisagées

- **Réutilisation déblais** en remblais de fouille et dans les remblais renforcés (caractérisations complémentaires et tri)
Problématique d'emprise/foncier pour la mise en stock provisoire
- Solutions **chaussées** évoquées : **réutilisation** pour fabrication d'enrobés bitumineux ou **recyclage** en couche de réglage sur le projet ? → *PI661 : trop faibles volumes/périmètre restreint (chaussées au lot 1 majoritairement).*
- Aciers (armatures et poutrelles) → Incitation à l'utilisation d'aciers issus de **filière électrique** : **objectif mini imposé 80%**.
Et filières de **fabrications locales** (réduction émissions transport)
- **DR béton** : **recyclage** (idem bétons de structure)
DR acier (BN5 NF) : **recyclage** (idem armatures) ou **recupération** par exploitant pour éventuels travaux de réparation de barrières identique à l'existant linéaire < 200ml

DECHETS	Démolition OA existant BA (hors QAV)	m3 de béton démoli
	total :	2 320
	Déblais (y.c. QAV)	m3 de déblais
	total :	7 160
	Armatures (hors QAV)	kg d'armatures**
	total :	231 600
	Dispositifs de Retenue (hors QAV)	ml de DDR
	Barrières NF type BN5	210
	Garde-corps	150
	total :	360
	Chaussées (hors QAV)	tonnes d'agrégats
	Rabotage de l'enrobé sur l'OA existant	600
	Rabotage pour fouilles RN7	200
total :	800	



Valorisation des bétons de démolition

2 types de valorisations envisagées :

- **Valorisation pour production de granulats recyclés pour le béton** sous couvert de la NF EN 206/CN et Fascicule 65
→ conditions limites d'utilisation → très restrictif donc rare en OA

NF EN 206/CN : Tableau NA.5

Type de granulat recyclé	Classes d'exposition			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XD1, XS1	Autres classes d'exposition
Gravillon Type 1	60	30	20	0
Gravillon Type 2	40	15	0	0
Gravillon Type 3	30	5	0	0
Sable	30	0	0	0

Tableau NA.5 : Taux de substitution, par rapport à la masse totale de gravillon ou de sable, en fonction de la classe d'exposition et du type de granulat recyclé (%)

Fascicule 65 (Article 8.1.2.2 Granulats):

« Les gravillons recyclés de type 1 (selon la norme NF EN 206/CN) issus de la déconstruction d'ouvrages d'art et dont la traçabilité est assurée peuvent être utilisés pour des bétons de **classe de résistance inférieure à C35/45 en classe XC1, XC2, XC3, XC4 ou XF1 avec un taux maximum de substitution de 20 % (en masse).** »



Cas du PI661 : uniquement béton non structural (béton de propreté, béton de remplissage et formes de pente) : 3% volume totale béton De plus nécessite mise en place centrale → pas à l'échelle du projet / problème d'emprises

- **Valorisation + courante en remblais** (VRD, couches de forme ou d'assise).
Réutilisation du béton déconstruit pour les blocs techniques moyennant essais complémentaires.
Installation concassage fixe ou mobile ? → Installations fixes existantes dans un rayon de 10-20km, pas d'installation mobile.
Besoins supplémentaires en matériaux : **carrières en activité ou recyclage** de **matériaux inertes existants**.



→ **Limitation des transports : GES**
→ **Limitation du puisement des ressources**

Approche performantielle

- ≠ Approche prescriptive consistant à « *jouer sur les ciments* »
- **L'approche performantielle** est cadrée par le **Fascicule 65** et plusieurs recommandations :
 - « Maîtrise de la durabilité des ouvrages en béton – Application de l'approche performantielle », LCPC (Mars 2010)
 - « Méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons » FNTP, FFB, Cerib, FIB (Mars 2009)

Cette approche tend à s'inscrire dans l'environnement propre du projet → **contraintes spécifiques en terme de performance** → implique **plus de souplesse dans la formulation** du béton → diminution plus importante de l'impact carbone (ce qui n'est pas l'objectif 1^{er} de l'approche...)

Se traduit par :

- Deux additions au lieu d'une → réduction de la part de clinker
- Teneur en liant équivalent mini plus faible
- Abaissement de la classe structurale jusqu'à -2 (→ réduction des enrobages, adaptation des indicateurs de durabilité).
- Plus grande souplesse dans l'utilisation des granulats locaux par rapport aux règles usuelles

- Travail setec ALS / Lerm / Cerema :
 - ✓ **Choix des approches** de formulation des bétons par parties d'ouvrages
 - ✓ Détermination des prescriptions pour ses bétons : classes d'expositions → **indicateurs de durabilité.**
 - ✓ Imposition au CCTP d'un **taux d'abattement des GES minimum** à atteindre.

Démolition/reconstruction du PI661 à Bourg-Lès-Valence



setec

Approche performantielle

- Définition des indicateurs de durabilité

Tableau 1 – Seuils d'indicateurs de durabilité spécifiques au projet par partie d'ouvrage

Partie de l'ouvrage	Classes d'exposition	Indicateurs de durabilité			Résistance (Mpa)
		Peau ⁽¹⁾ 90j (%)	K_{gaz} 90j ⁽²⁾ (10-18 m ²)	D_{app} 90j ⁽³⁾ (10-12 m ² /s)	
Béton de propreté, ou de remplissage	X0				C16/20
Gros béton, béton de substitution	XC2				C16/20
Appuis du pont					
Pieux	XC2, XD2				C30/37
Semelles enterrées	XC2, XD2				C30/37
Elévation d'appuis en contact avec le sol ou enterrées (piédroit en contact avec le sol)	XC2, XD2				C35/45
Elévation d'appuis côté vu (piédroit à l'air libre)	XC4, XD3, XF2				C35/45
Dalles de transition et de frottement	XC2, XD2, XF2				C30/37
Tablier du pont					
Face supérieure de la traverse PPE en béton armé, protégée par une étanchéité (extrados)	XC3, XF1				C35/45
Face inférieure de la traverse PPE (intrados)	XC4, XD3, XF2				C35/45
Longrines de rive de tous les tabliers (support équipement, barrière, garde-corps, ...)	XC4, XD3, XF2				C35/45

⁽¹⁾ *Peau* : porosité accessible à l'eau

⁽²⁾ *K_{gaz}* : perméabilité au gaz

⁽³⁾ *D_{app}* : coefficient de diffusion apparent des chlorures

Tableau 2 – Seuils d'indicateurs de durabilité vis-à-vis du risque de Réaction Sulfatique Interne

Partie d'ouvrage	Classes d'exposition	Niveau de prévention	Indicateurs de durabilité
Traverse, longrines, dalles de transition et de frottement	XH2	Bs	
Fondations, semelles et piliers	XH3	Cs	

Nota : pour les parties d'ouvrages de classes XD3 + XF2 (sous face de la traverse, longrines et face intérieure des piliers) une valeur de teneur en air occlus supérieure ou égale à X% devra également être vérifiée.

Démolition/reconstruction du PI661 à Bourg-Lès-Valence



setec

Recherche d'un taux d'abattement cible des émissions **carbone des bétons**

- Identification **bétons de référence** (béton courant majoritairement utilisé dans les travaux d'ouvrages d'art et génie civil, non optimisé).
- Trois formules : **C35/45 XD3** , **C30/37 XD2** et **C16/20 X0**. Ciment retenu **CEM II/A-L**

Béton pour :	Quantité de béton (m3)	Résistance attendue	Classes d'exposition	Formule						Total kg eq CO2 Formule	Transport amont des principales matières premières (km)								Total kg eq CO2 Transport amont	TOTAL Emission kg eq CO2 solution de référence	
				Ciment			Sable	Gravillon	Adjuvant		Ciment		Addition		Sable		Gravillon				
				type	quantité (kg/m3)	FE eq CO2/UF	quantité (kg/m3)	quantité (kg/m3)	quantité (kg/m3)		Route	Frêt	Fluvial	Route	Fluvial	Route	Fluvial	Route			Fluvial
Semelles	350	C30/37	XC2, XD2	CEM II/A-L	330	676	750	850	3	81 592	124	18.2	26			22	22.3	22	22.3	3 013	84 605
Piedroits, traverse, dalle de transition	1750	C35/45	XC4, XD3, XF2	CEM II/A-L	350	676	750	850	3	431 620	124	18.2	26			22	22.3	22	22.3	15 501	447 121
Béton des écailles et mur en T inversé	110	C35/45	XC4, XD3, XF2	CEM II/A-L	350	676	750	850	3	27 130	124	18.2	26			22	22.3	22	22.3	974	28 105
Pieux	280	C30/37	XA1, XC2, XD2	CEM II/A-L	330	676	750	850	3	65 274	124	18.2	26			22	22.3	22	22.3	2 411	67 684
Longrine, dalle de frottement	120	C35/45	XC4, XD3, XF2	CEM II/A-L	350	676	750	850	3	29 597	124	18.2	26			22	22.3	22	22.3	1 063	30 660
Béton propreté / gros bétons / formes pentes	280	C16/20	X0	CEM II/A-L	150	676	750	850	0	29 624	124	18.2	26			22	22.3	22	22.3	1 785	31 409

Ciments UF = tonnes	Facteur d'émission (en kg CO2 eq /UF)
CEM III/A (non PM-ES)	464
CEM I	765
CEM II/A-L	676
CEM II/A-S	671
CEM II/B-L	579
CEM II/B-M	585
CEM III/B	274
CEM III/A PM-ES	319
CEM IV/A	491
CEM V/A	468

- Recherche de solutions possibles avec approche performantielle
- **Évaluation d'un taux d'abattement minimum : 25%**



Challenger les Entreprises

Enjeu de réduction de l'impact carbone

Objectif atteignable

Risque de marché infructueux

Exigence ASF modérées



AFGC
Association Française de Génie Civil

Démolition/reconstruction du PI661 à Bourg-Lès-Valence



Calculatrice **carbone des bétons**

Création d'un outil : **Calculatrice Carbone des Bétons**

Objectifs : Donner un **cadre** permettant de **comparer les solutions** proposées dans les différentes offres.

A remplir par l'entreprise dans le cadre de son offre :

- type et quantité de ciment et d'addition,
- quantité de sable, gravillons et adjuvants,
- données sur les transports amont de ces matières premières.

Facteurs d'émissions préremplis :

- Ciments : ATILH (Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques)
- Additions : DIOGEN (base de données issues des travaux de l'AFGC) ou déclaration producteurs
- Granulats (sable et gravillon) : UNICEM (Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction)
- Adjuvants : SYNAD (Syndicat des fabricants d'adjuvants béton colorants fibres)

Vérification automatique des rapport Eff/Leq conformément au F65.

Calcul automatique du **taux d'abattement** par rapport à la solution de référence.

Candidat 1	Béton pour :	Quantité de béton (m3)	Résistance attendue	Classes d'exposition	Type d'approche	Formule										Total kg eq CO2 Formule	Transport amont des principales matières premières (km)												Total kg eq CO2 Transport amont	TOTAL Emission kg eq CO2 solution proposée	TOTAL Emission kg eq CO2 solution de référence	Pourcentage d'abattement		
						vérifications		Ciment		Addition		vérifications	Sable	Gravillon	Adjuvant		Route	Ciment			Addition			Sable			Gravillon							
						Leq min	Eff/Leq max	type	quantité (kg/m3)	Facteur émission eq CO2/UF	type							quantité (kg/m3)	Facteur émission eq CO2/T	Verif Leq min	quantité (kg/m3)	quantité (kg/m3)	quantité (kg/m3)	Route	Frêt	Mer	Fluvial	Route					Frêt	Mer
	Semelles	350	C30/37	XC2, XD2	Performantielle	257.6	0.6		#REF!		#N/A	#DIV/0!				#REF!													0	#REF!	84 605			
	Piedroits, traverse, dalle de transition	1750	C35/45	XC4, XD3, XF2	Classique Optimisée	342	0.45		#REF!		#N/A	#DIV/0!				#REF!													0	#REF!	447 121			
	Béton des écaillés et mur en T inversé	110	C35/45	XC4, XD3, XF2	Performantielle	273.6	0.55		#REF!		#N/A	#DIV/0!				#REF!													0	#REF!	28 105	#####		
	Pieux	280	C30/37	XA1, XC2, XD2	Performantielle	257.6	0.6		#REF!		#N/A	#DIV/0!				#REF!														0	#REF!	67 684		
	Longrine, dalle de frottement	120	C35/45	XC4, XD3, XF2	Performantielle	273.6	0.55		#REF!		#N/A	#DIV/0!				#REF!														0	#REF!	30 660		
	Béton de propreté /gros bétons et formes de	280	C16/20	X0	Classique Optimisée	150	1		#REF!		#N/A	#DIV/0!				#REF!													0	#REF!				

Démolition/reconstruction du PI661 à Bourg-Lès-Valence



Réponses à l'AO travaux des entreprises – passation du marché

5 offres reçues : toutes ont respecté le recours à l'AP et ont présenté un taux d'abattement $\geq 25\%$



- Taux d'abattement général sur le béton → 30% (avec une entreprise à 40%)
- AP plutôt mal connue par les centrales à bétons moyenne/petite taille : seuls 2 bétonniers consultés
- Pas de formulation « pré-qualifiée » parmi les offres
- Engagement sur le taux d'abattement pas sur les formulations
- Taux abattement $\geq 25\%$ atteignable par approche prescriptive
- Taux abattement plus élevés atteignables par AP

→ Bilan général (estimation) :



Bilan référence non optimisé: 1450 teq. CO₂ (690t béton + 760t acier/charpente)

Bilan objectif « bas-carbone » : 1010 teq. CO₂ (480t béton + 510t acier/charpente) → -30% émissions CO₂



REX sur la démarche et ses limites

- Approche performantielle :
- **Principe et avantages** de la méthode : approche « projet » → exigences de durabilité → résoudre des exigences difficiles à concilier par l'approche prescriptive → au final elle se révèle être un **atout fort** dans la réduction de l'empreinte carbone de nos opérations
- **Limites de l'approche performantielle** :
 - Nécessité d'anticiper / **impact planning** important (REX PI661)
 - Maîtrise du comportement des bétons à la mise en œuvre
 - Encore **peu de REX** d'application sur projets GC de grande taille.
 - **AP mal connue** des centrales à béton de petite/moyenne taille
 - Evolution normative → attente révision de la **NF EN206/CN** courant 2022 (AP granulats, etc.)
 - Intérêt de l'approche prescriptive (FE de CEM à faible teneur en clinker, allocation CO2, etc.)
- **REX PI661 : limites de la démarche « bas-carbone » retenue** : choix des bétons de référence et ambition sur les taux d'abattement.

- Moyens pour **palier à ces limites** :
 - Fédération des parties prenantes
 - Anticipation par les entreprises en phase offre, prévalidation de formulation en attente des essais
 - Recours à des formules dites « **pré-qualifiées** »
- **Tendance** : AP sujet industriel/commercial à fort enjeu → Création de catalogue par les entreprises/bétonniers en AP en fonction de l'usage

La construction bas carbone :
Le retour d'expérience d'un
exemple concret : opération PI661



Journée AFGC 31/03/2022

Merci pour votre attention



Contact :
Stefano Richiardi
stefano.richiardi@setec.com
Tél. 04 27 18 57 62
Port. 06 85 85 97 59

Setec **ALS** - Immeuble Le Crystallin,
191-193, cours Lafayette CS 20087
69458 Lyon Cedex6

