

Mardi 26 novembre 2024 de 14h00 à 15h00

**Session 3 : L'économie circulaire au service
d'une démarche bas carbone
(Laurent GAUTRON et Mathieu GALIANA)**

Session 3 – L'économie circulaire au service d'une démarche bas carbone

(animateurs : Laurent GAUTRON & Mathieu GALIANA)



François TOUTLEMONDE
Université Gustave Eiffel

L'évolution de la normalisation dans le domaine du béton vers les solutions « bas carbone »



Vincent GROSSHENNY
FRTP

L'économie circulaire, levier de décarbonation des chantiers de travaux publics



Laurent GAUTRON
Université Gustave Eiffel

Valorisation des terres excavées pour la conception d'un liant géopolymère



Université
Gustave
Eiffel

DÉPARTEMENT

MAST
MATÉRIAUX
ET STRUCTURES

François TOUTLEMONDE

Président de la commission
AFNOR/P18B

Animateur groupe de révision
du Fascicule 65

Délégué français au CEN
TC104/SC1

Journée « Les freins et les leviers de l'économie circulaire et de la construction décarbonée »

26 novembre 2024

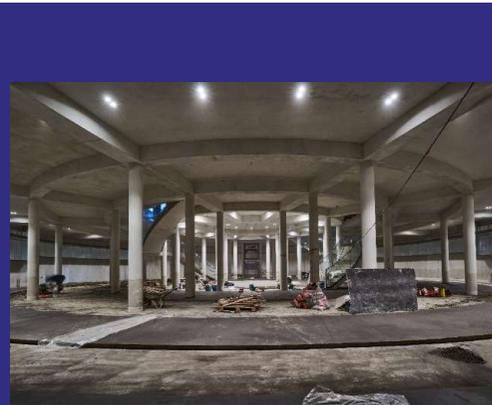


Evolution de la normalisation dans le domaine du béton, vers les solutions « bas carbone »

- contexte, objectifs et acteurs
- normes nationales (commission P18B)
- fascicule 65
- évolutions européennes en préparation



Université
Gustave Eiffel



Décarbonation : maturité des différents leviers

Moins de béton

Levier important (conception sobre) lorsque le béton a une fonction structurale

Outils disponibles en conception (BHP, BTHP)

Freins = utilisation pour thermique, acoustique

Modification d'usages et outils

Moins de liant dans le béton

Saine optimisation de formulation mais levier faible

Inadapté aux BAP / bétons fluides

Moins de clinker dans le liant total

Levier nécessaire à court terme, « presque » transparent pour concepteur et utilisateur

Nécessite **évolution normative** (constituants du ciment et additions)

Moindre impact carbone du clinker

Levier principal à terme (carburants alternatifs, captage CO₂ à la source)

2 Investissements lourds des cimenteries

Moindre impact carbone **de l'exécution**

Leviers faibles pour procédés traditionnels

Impact délai / cure des « bétons verts » à anticiper

Levier potentiel fort des procédés sans coffrages

(projection, impression 3D) et limitant l'aléa chantier (construction hors site)

Moindre impact carbone des **granulats**

Questions de ressources et transport >> CO₂

L'économie pousse aux ressources locales

Granulats de bétons recyclés **permis par les normes**

Point dur technique = résistance au feu

Pour une même **unité fonctionnelle**

A **durée de vie de projet** non dégradée

Importance des règles de spécification / concurrence

Attention aux effets pervers

Rôle fort des **normes**

« Bas carbone », on peut en faire déjà

Empreinte CO₂ comparée des **ouvrages jumeaux** de la déviation de Bourges (PN BHP 2000)



	Béton C35/45* et armatures *271 kgCO ₂ eq/m ³	Béton C80/95** et armatures **335 kgCO ₂ eq/m ³
Elancement	1/22	1/30
Poids du tablier (t)	975	520
Béton : volume / empreinte CO₂	390 m ³ 105 495 kgCO ₂ eq	188 m ³ 62 974 kgCO ₂ eq
Aciers béton armé 1140 kgCO₂eq/t	39 t 44 460 kgCO ₂ eq	39 t 44 460 kgCO ₂ eq
Précontrainte 1140 kgCO₂eq/t	12 t 13 680 kgCO ₂ eq	8 t 9 120 kgCO ₂ eq
Total kgCO₂eq	163 635	116 554

Réduction de 29% en faveur du BHP (hors valorisation chantier, appuis et durabilité)

« Bas carbone », on peut en faire déjà

moyenne nationale de l’empreinte carbone de quelques ciments normés (France ciment, 2023)



Type de ciment	CEM I	CEM II/A-S, A-S, A-V	CEM II/A-L	CEM II/B-M	CEM II/B-L	CEM V/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/C
% de clinker	95-100	80-94	80-94	65-79	65-79	40-64	35-64	20-34	5-19
Kg eq. CO ₂	752	619	640	554	547	479	467 non PM ES 334 PM ES	316	199

Pour les ciments de type CEM II/C-M et CEM VI, l’empreinte carbone en kg eq. CO₂ varie, respectivement, entre 467 et 479 et entre 334 et 437

« Bas carbone », on peut en faire déjà

empreinte carbone de différentes additions utilisées dans le béton (Cerib, 2022)

Addition	Norme Produit	Empreinte (kg CO ₂ eq./ tonne)
Filler et additions calcaire	NF P 18-508	30-60
Additions siliceuses	NF P 18-509	60-120
Pouzzolane naturelle		30-60
Métakaolin (argile calcinée)	NF P 18-513	139-239
Laitier moulu de Haut Fourneau	NF EN 15167	100 (allocation économique)
Cendres Volantes (siliceuse)	NF EN 450	47,5
Fumée de Silice	NF EN 16622	354

La **combinaison accrue d'additions au ciment**, par composition du liant dans le malaxeur, **et l'utilisation plus fréquente de ciments avec une proportion accrue de constituants autres que le clinker**, sont les leviers de décarbonation les plus efficaces dans l'immédiat, si la conception structurale est figée

Ce qui est possible dans NF EN 206+A2/CN:2022 via l'aptitude à l'emploi des ciments 197-5 et l'approche performantielle – à faciliter et élargir

→ D'où l'effort prioritaire des évolutions normatives à venir

Décarbonation et normes : qui s'occupe de quoi ?

Moins de béton

Eurocode, fascicules, méthodologie
TC350, TC104/SC1/WG19
BNTRA CN EC2

Moins de liant dans le béton

EN 206 et fascicules
AFNOR/P18B

Moins de clinker dans le liant

EN 206, normes additions et fascicules
AFNOR/P18B et P18C

Moindre impact carbone du clinker

EN 197
AFNOR/P15A

Moindre impact carbone de l'exécution

NF EN 13670, NF EN 13369, DTU 21
BNTEC / P18E
AHG TC104/SC1 pour impression 3D

Moindre impact carbone des granulats

Normes granulats
BNTRA GRA
Aptitude à l'emploi EN 206
AFNOR/P18B
Effet sur le calcul EN 1992
BNTRA CN EC2

Pour une même unité fonctionnelle

A durée de vie de projet non dégradée
Normes ACV, écoconception, Eurocodes, fascicules

Contexte et acteurs – décarbonation de la filière béton

On travaille...

En France

- La demande explicite d'un cadre pour la spécification « bétons verts » date de fin 2020 (parallèle à l'établissement de la RE 2020 – cf ex. Cahiers des charges SGP)
- Initiative d'un groupe **GE SBC** au sein de la commission AFNOR P18B : mai 2021
- Stabilisation feuille de route, composition et organisation (5 TF) : mars 2022
- Création d'un groupe mixte (TF6) avec BNTRA CN EC2 et feuille de route : mars 2023
- Lancement mise en cohérence / **révision du fascicule 65** : février 2023
- Enquêtes en cours pour révision 2025 de NF EN 206/CN + FD

En Europe

- Révision des Eurocodes (validation EN 1992 en 2023 – entrée en vigueur au plus tard en 2028)
- Préparation d'une partie « approche performantielle » de l'EN 206 → CEN/TR
- Création au sein du TC104/SC1 du WG19 (sustainability) WG20 (new constituents)
- La commission révisé le RPC et veut agrandir le domaine harmonisé (processus de l'« acquis »)

Ne pas présager du consensus

Il résulte de **discussions, parfois encore en cours, qui doivent rester confidentielles**

Il peut nécessiter des données / connaissances non encore acquises

La spécification « bas carbone »

Niveau européen : TC104/SC1/WG19

Préparation de deux **CEN/TR** sur l'**écoconception** des structures en béton – *en cours d'enquête*

Préparation de l'introduction de classes **GWR** dans l'EN 206 - approuvé

→ Classes de réduction de l'empreinte carbone (kg CO₂ eq/t)
Par rapport à un liant de référence (CEM I ou national)

Niveau français : AFNOR /P18B/GE SBC / TF2 et TF6

Préparation de clauses nouvelles dans **NF EN 206/CN** appelant le **FD P18-483**

« Ecoconception des structures en béton »

Partie 1 (écoconception, prescription et exécution) *prévue pour fin 2025*

Partie 2 Spécification des bétons pour des ouvrages à impact carbone réduit *finalisée*

→ **Classes GWR0 à GWR7** de réduction de l'empreinte carbone (kg CO₂ eq/t)
Par « tranches de 10 % » par rapport à un liant de référence (CEM I « daté »)

GW100R0 à GW100R7 pour bétons d'ouvrages de durée d'utilisation de projet 100 ans

→ Clarification de l'interprétation de la **spécification** permettant une interprétation
– strictement « matériau », sans changer les quantités / dimensions
- ou avec réduction des quantités, visant une empreinte globale optimisée

Précise la **Note du Cerema** parue en avril 2024

« Solutions en béton à impact environnemental réduit dans les ouvrages d'art »

Méthode performantielle de justification de la durabilité : ERC

approche la plus complète à moyen terme

Révision de l'Eurocode 2

Entrée en vigueur au plus tard 2028 – mais texte adopté par vote formel mi-2023

Annexe nationale en cours d'élaboration

- Introduction de classes de résistance aux expositions (**ERC**)
Vis-à-vis de la carbonatation (XRC) et vis-à-vis des chlorures (XRDS)
Détermination de l'enrobage sur la base de ces classes
→ Possibilité de t_{ref} entre 28 et 91 jours

Révision de l'EN206 pour introduire les ERC

CEN/TR en préparation par TC104/SC1/WG1 (échec EN 206-100)

Annexe nationale EN 206-1 à préparer en 2026

Disponibilité à partir de 2027 pour en permettre l'application conjointe avec l'EC2 révisé

- Introduction de spécifications nationales pour **bétons avec fibres**
→ Introduction des critères associés aux classes de résistance aux expositions (ERC)
Seuils de vitesse de carbo. accélérée (**XRC**), Seuils de migration de chlorures (**XRDS**)
Relaxation des règles prescriptives
Calibration : il sera recherché une **continuité avec FD P18-480**

Méthode performantielle de justification de la durabilité : seuils / classes structurales - *approche opérationnelle à court terme*

Niveau français : AFNOR /P18B/GE SBC / TF3 et groupe ad hoc

Révision du **FD P18-480** par ajout d'une 2^{ème} approche

Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle

- **Approche à composition unique**
- **Approche par domaine de composition**

Document en cours de finalisation après enquête – publication prévue 2025

Principe de l'approche par domaine de composition

- Justification par approche performantielle de bétons déterminant un domaine de composition (si 3 constituants : extrémités barycentre et dérivées d'un triangle dans diagramme ternaire)
- Cette « étude générique » couvre des bétons dont le liant total a la même composition, dont les granulats sont au moins aussi compacts, dont le rapport eau/liant est au plus égal à celui testé
- Etude, convenance et contrôles des bétons couverts par cette étude générique avec vérification de régularité seulement
 - Liants binaires, ternaires ou quaternaires réalisés à partir de constituants normalisés, possibles mélanges de ciments
 - Teneur minimale 25% de clinker, domaine des ciments normalisés
 - Logique de **préqualification** pour simplifier la mise en œuvre de l'approche

Liants alternatifs et nouvelles additions

Niveau européen : TC104/SC1/WG20 et WG18, également TC51

Déclinaison du CEN/TR 16 912 pour de nouveaux ciments

Préparation d'une norme sur les **additions** calcaires

Identification de **constituants à normaliser** au niveau européen (argiles activées, pouzzolanes naturelles, autres ?...)

→ Pas de surprises attendues

Niveau français : AFNOR /P18B/GE SBC / TF1 et GE NC

- Révision de la clause d'**aptitude à l'emploi des ciments selon NF EN 197-6** dans la NF EN 206/CN révisée : en approche performantielle à composition unique seulement
- Nouveau fascicule **FD P18-484** : futur **référentiel pour avis technique** (du Cerema, CSTB...)
Document en cours de finalisation après enquête – publication prévue 2025

→ Déclinaison d'un dossier de **qualification d'un nouveau liant/addition** selon son degré de « nouveauté », en vue d'évaluer son aptitude à l'emploi dans le béton lorsqu'elle n'est pas établie par une norme

- propriétés physiques et mécaniques, durabilité, caractéristiques sanitaires
- retour d'expérience industrielle, propriétés constructives en ouvrage

Principales autres évolutions (approche prescriptive NF EN 206/CN)

Ouvrages provisoires : AFNOR /P18B/GE SBC / TF5

Clauses modificatives en annexe de la **NF EN 206/CN** pour les ouvrages provisoires à durée de chantier – *en cours de finalisation suite à enquête*

- **Relaxation** des spécifications de composition issues de la durée d'utilisation de projet de référence (très inférieure à 50 ans)

Spécifications prescriptives des bétons de structure : AFNOR /P18B/GE SBC / TF3

Relaxation des spécifications excessives de la **NF EN 206/CN** – *en cours de finalisation suite à enquête*

- Classe **XC0** (sec – non armé hors chaînages - intérieurs de bâtiments)
- Révision de la modulation du **volume minimal de pâte en fonction du D_{max}**
 - Elargissement des conditions d'emploi de **mélanges de ciments**
 - **Extension du concept de liant équivalent** avec plusieurs additions
- Révision des limitations de **A/A+C**, élargissement des ciments pouvant être combinés à des additions dans les Tableaux NAF1- NAF2
- Révision de la calibration et précision de l'utilisation des Tableaux NAF3 – NAF4 (bétons d'ingénierie)
- Révision des conditions de **modulation d'enrobage suivant nature du liant** en classes XC1, XC2, XC3 et XC4 (au-delà du CEM I)
 - Révision de la **limitation des sulfures** dans les liants (*à confirmer*)

En résumé

Paquet 2025 :

NF EN 206/CN révisée – *enquête publique probablement en janvier*

FD P18-483 partie 2 *spécification « bas carbone »*

FD P18-480 *révisé avec introduction de l'approche par domaine de composition*

FD P18-484 *permettant d'évaluer l'aptitude à l'emploi de nouveaux ciments, liants ou additions*

+ *révision NF EN 1992-1-1/NA annexe nationale de l'EC 2 (classes d'exposition, bétons de granulats recyclés)*

+ *révision du Fascicule 65 du CCTG compatible en particulier avec FD P18-480 révisé et tableaux NAF révisés*

Formations/ informations envisagées AFGC et Cerema/RST entre avril et juin 2025

Prévu fin 2025 ou 2026

FD P18-483 partie 1 *écoconception*

Amendement NF EN 206/CN *pour mieux intégrer les ciments EN 197-6*

+

Révision à prévoir en 2027 :

Révision **NF EN 206-1/CN, NF EN 206-2/CN, NF EN 206-3/CN** – *suite reformatage européen*

Dispositions nationales ERC, bétons de fibres et autres compléments « bas carbone »

+

À date inconnue : incidence RPC ?



**Merci de votre attention
Bonne lecture au printemps 2025 !**

François Toutlemonde

Francois.toutlemonde@univ-eiffel.fr

01 81 66 83 97

 **Université
Gustave Eiffel**

L'économie circulaire, levier de décarbonation des chantiers de Travaux Publics

26/11/2024

#TravauxPublics #ÉconomieCirculaire

AVEC LE SOUTIEN FINANCIER DE :



AVEC LE SOUTIEN TECHNIQUE DE :



Vincent GROSSHENNY
Directeur Technique
Solutions Environnementales

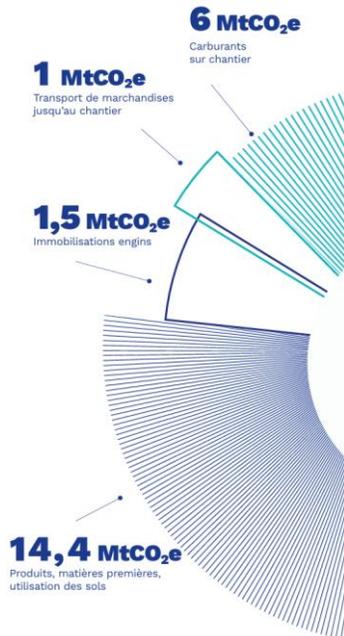


L'empreinte carbone d'un chantier

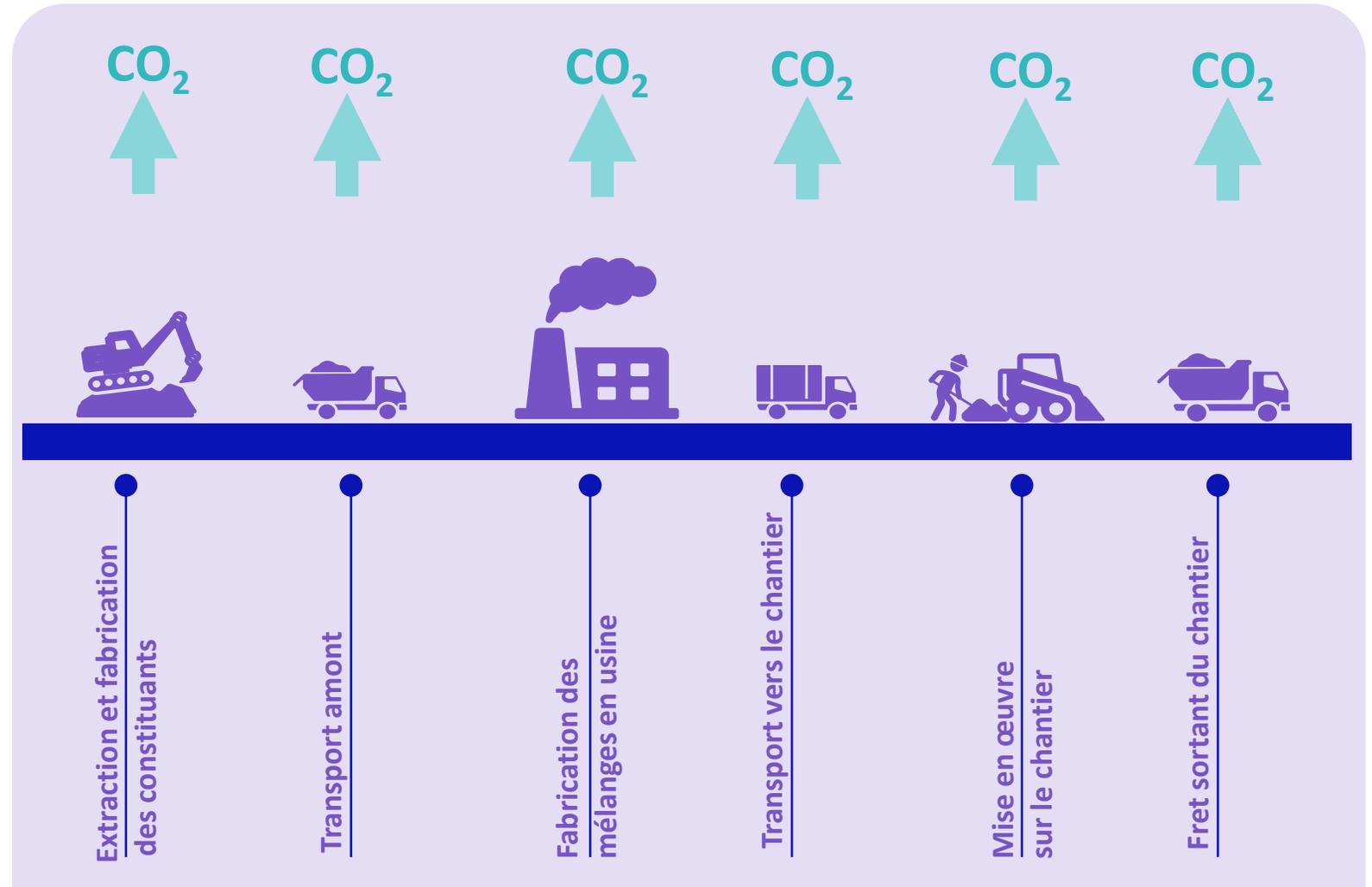
Chaque étape d'un chantier de TP génère des GES

Emissions générées par l'activité des entreprises des TP scope 1, 2 et 3a 2018

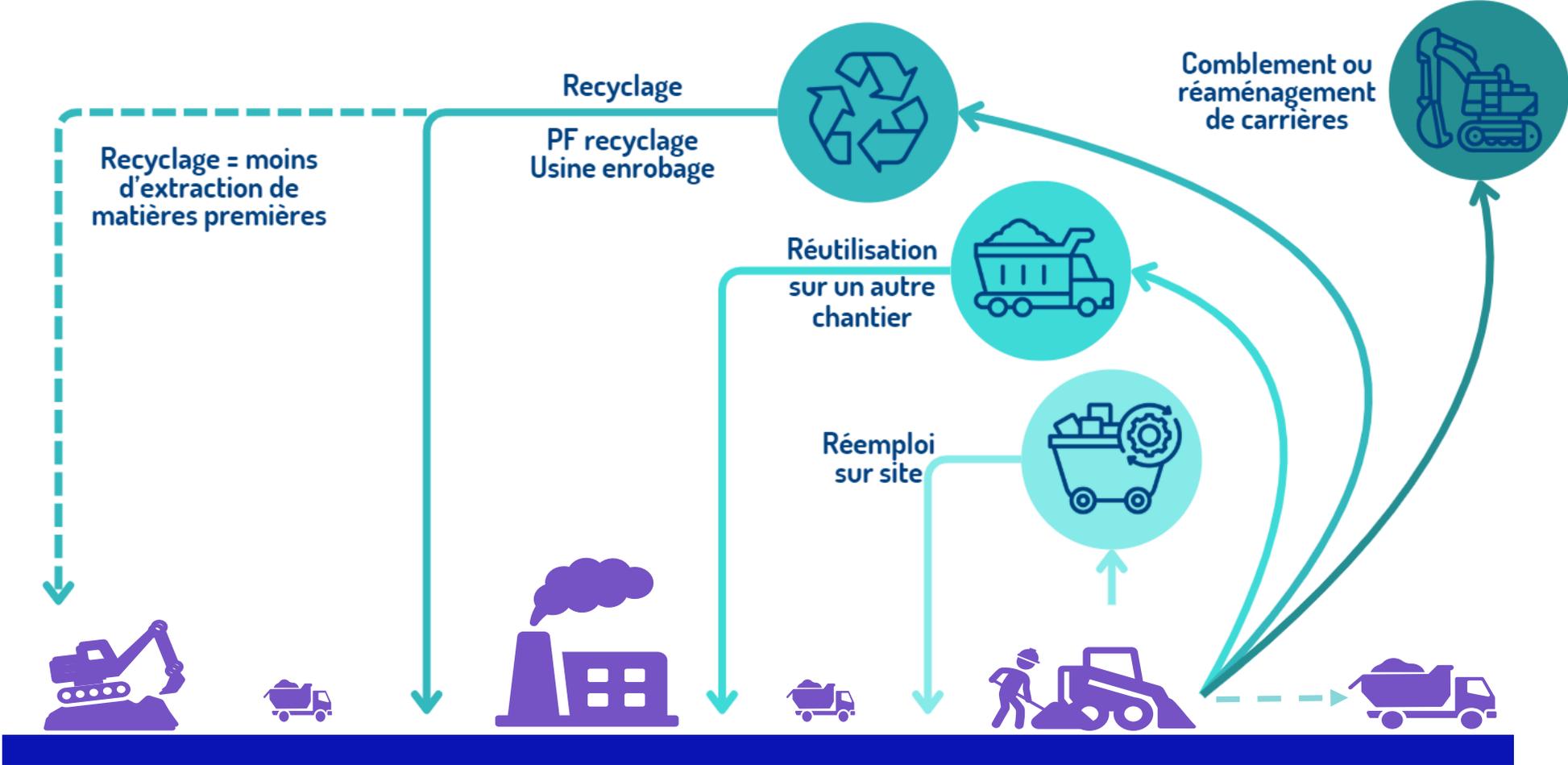
22,9 MtCO₂e
émissions carbone des activités TP.



La contribution des matériaux est la plus importante > 54%



L'économie circulaire appliquée aux chantiers TP



Leviers de décarbonation

Les cinq leviers de décarbonation des matériaux



Recyclage



Economie d'énergie



Economie de transport

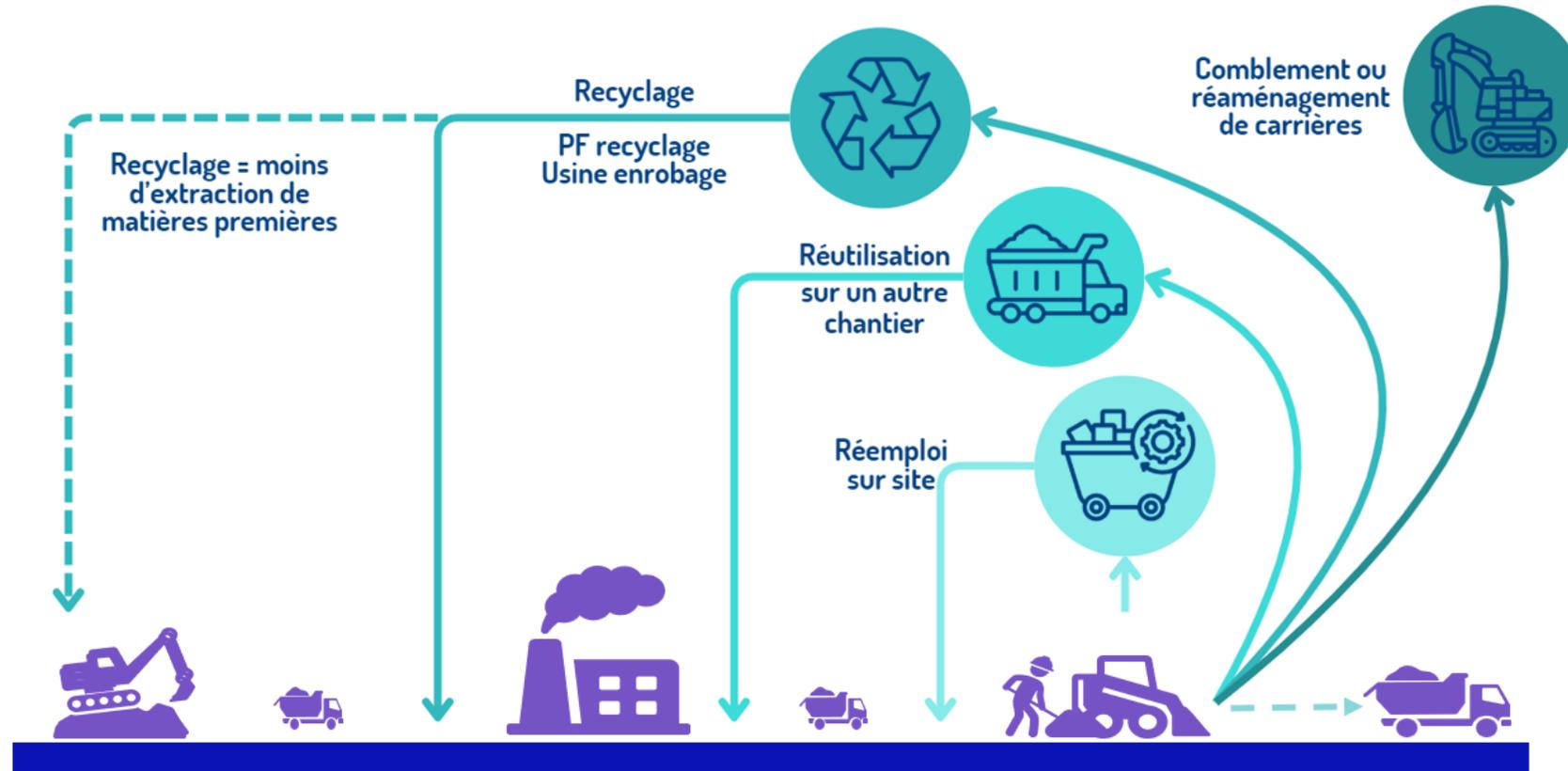


Utilisation de matières premières
moins carbonés



Economie de matériaux

L'économie circulaire active trois leviers



Levier	Recyclage	Réutilisation	Réemploi	Comblement ou réaménagement de carrières
Recyclage	✓	✓	✓	✓
Economie d'énergie		✓		
Economie de transport		✓	✓	✓
Utilisation de matériaux moins carbonés				
Economie de matériaux				

Deux exemples : granulats et enrobés

UNPG
UNION NATIONALE DES PRODUCTEURS DE GRANULATS

Fiche de déclaration environnementale et sanitaire
Environmental and health product declaration

Couche de forme en grave sous parking de zone d'activité – Granulats recyclés



December 2019 – version vérifiée par tierce partie indépendante

UNPG
UNION NATIONALE DES PRODUCTEURS DE GRANULATS

Fiche de déclaration environnementale et sanitaire
Environmental and health product declaration

Couche de forme en grave sous parking de zone d'activité – Granulats issus de roches massives



FDES
FRANCE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE

December 2019 – version vérifiée par tierce partie indépendante

Identification

Code * VJ Libellé * BBSG R0 Propriétaire CST Créateur GrosshennyABEAICST

Formule

Famille * Enrobés bitumineux [EB] Unité d'œuvre * Tonne

Description

Industrie * VJ-Usine enrobage [VJ]

Combustible

Combustible	Code	Pourcentage (%)
Gaz naturel	GAZ	100%

Composition

Code	Libellé
GR250	Agrégats d'enrobés courants
BI300	Bitume pur 50/70
GR100	Granulats Naturels

Coût environnemental pour une Tonne

Energie (MJ) 594,889 CO2 (t) 0,0374

Identification

Code * VJ Libellé * BBSG R30 Propriétaire CST Créateur GrosshennyABEAICST

Formule

Famille * Enrobés bitumineux [EB] Unité d'œuvre * Tonne

Description

Industrie * VJ-Usine enrobage [VJ]

Combustible

Combustible	Code	Pourcentage (%)
Gaz naturel	GAZ	100%

Température de fabrication (°C) 160

Total ratio : 100%

Composition

Code	Libellé	Transport	Énergie	Distance (km)	Double Fret	Transport multimodal	Ratio (%)
GR250	Agrégats d'enrobés courants	Aucun transport	Aucune énergie	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30%
BI300	Bitume pur 50/70	Transport par citerne, CU 24t	Diesel	500	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3.8%
GR100	Granulats Naturels	VJ - Acheminement moyen BBSG (Massif)			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	66.2%

Coût environnemental pour une Tonne

Energie (MJ) 524,738 CO2 (t) 0,0327 Granulats naturels (t) 0,662 Agrégats d'enrobés (t) 0,3

Granulats roches massives 2,59 kg CO₂/t
Granulats recyclés 1,61 kg CO₂/t

-38%

BBSG R0 37,4 kg CO₂/t
BBSG R30 32,7 kg CO₂/t

-13%

Valoriser ses éco-variantes avec Seve-TP

#TravauxPublics #ÉconomieCirculaire

AVEC LE SOUTIEN FINANCIER DE :



AVEC LE SOUTIEN TECHNIQUE DE :



L'éco-comparateur SEVE-TP

SEVE - TP

SYSTÈME D'ÉVALUATION DES VARIANTES ENVIRONNEMENTALES

OUTIL COMMUN DE LA PROFESSION DES TRAVAUX PUBLICS



OBJECTIF : RÉDUIRE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES INFRASTRUCTURES

- ✔ Outil **gratuit**
- ✔ Interface **simple**
- ✔ Représentation **synthétique** des résultats
- ✔ Outil **transparent, fiable et vérifié**



UN LANGUAGE COMMUN ENTRE DONNEURS D'ORDRE ET ENTREPRISES DE TP

ENTREPRISE TP

- ✔ **Quantification** intérêt environnemental des variantes

DONNEUR D'ORDRE

- ✔ **Prédimensionnement** d'offres
- ✔ **Eco-comparaison** de variantes

L'éco-comparateur SEVE-TP



SEVE-TP permet de comparer l'empreinte environnementale de solutions techniques offrant le **même niveau de service** et les **mêmes fonctionnalités** (même durée de vie).



Sur la base de données environnementales :

- Génériques
- Propres à l'entreprise si l'utilisateur ajoute des ressources spécifiques (avec un justificatif)



« **Bilan Carbone** » simplifié

SEVE-TP ne calcule donc pas le bilan carbone complet d'un chantier mais uniquement les postes d'émission les plus significatifs



À noter que le système de modélisation ne prend pas en compte :

- Le déplacement du personnel
- Les infrastructures des usines
- L'utilisation des bases vie

Périmètre de modélisation de l'outil

Utilisation courante de SEVE-TP :
Evaluation des opérations qui seront à réaliser contractuellement dans le cadre de l'appel d'offres

Transport en amont

Transport vers le chantier

Fret et gestion des produits sortants

Extraction des matières premières

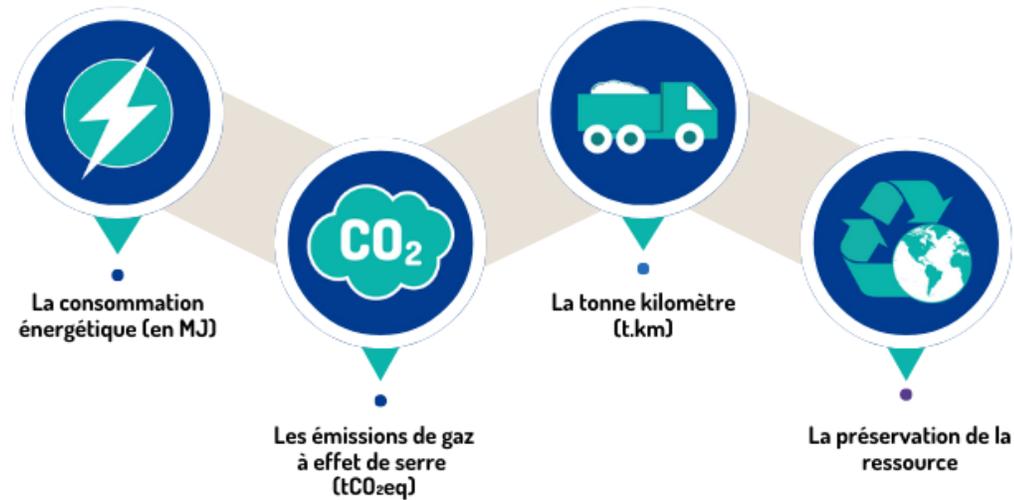
Fabrication des produits/
Fabrication des mélanges

Mise en œuvre sur le chantier

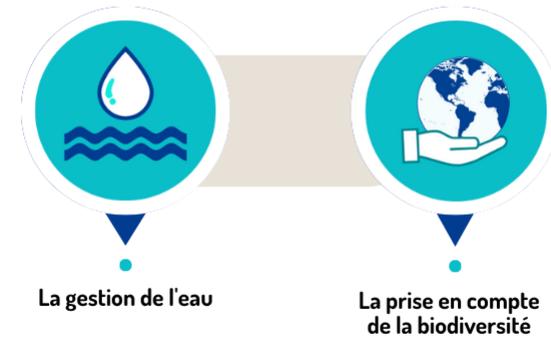


Indicateurs calculés

Indicateurs quantitatifs



Indicateurs qualitatifs et optionnels



Focus : préservation de la ressource



**La préservation de la
ressource**

- Consommation de granulats naturels (tonnes)
- Consommation de matériaux recyclés (tonnes)
- Consommation d'agrégats d'enrobés (tonnes)
- Consommation de déblais issus du chantier et réutilisés sous l'emprise du projet (tonnes)

Démonstration de l'économie circulaire qui sert la décarbonation

#TravauxPublics #ÉconomieCirculaire

AVEC LE SOUTIEN FINANCIER DE :



AVEC LE SOUTIEN TECHNIQUE DE :



Visuel de l'outil

Pose tuyau PEHD D250 [D mo_Cana]

Actif

Projet Solutions Scénario

Solutions du projet +

Ecovariante Solution de base

Commentaire à faire apparaître dans le rapport final PDF

Choix de l'indicateur :  mission de gaz à effet de serre... Total émission de gaz à effet de serre = 97.37 tCO2eq

Operations du projet +

- ^ Ouverture Total = 20.64 tCO2eq
- ^ Pose de la canalisation Total = 64.98 tCO2eq
- ^ Remblai Total = 8.22 tCO2eq
- ^ Finition Total = 3.53 tCO2eq

Modélisation des solutions techniques avec :

- Choix des opérations/phases modélisés
- Aucune coupe type renseignée

Pour chaque opération/phase :

- Produits entrants – avec fret associé
- Produits sortants – avec fret associé
- Engins utilisés

Operations du projet +

- ^ Ouverture Total = 20.64 tCO2eq
- ^ Pose de la canalisation Total = 64.98 tCO2eq
- ^ Remblai Total = 8.22 tCO2eq

Créateur: BEUDON_FNTP

Type d'opération *: Travaux de canalisation

Description du projet

Produits entrants Produits sortants Engins

Produit	Transport	�nergie	Trs. multimodal (km)	Dist.	Double Fret	U.O	Qté
GNT - Grave non traitée [GR130]	Transport par camion 18t	Diesel	30		<input type="checkbox"/>	Tonne	1325

+ Ajouter un produit

Démonstration par l'exemple



Modélisation d'un projet de construction d'une section de route départementale de longueur 1 km et de largeur 7 m

Solution de base :

- Plateforme support PF2 : Evacuation terres + apport matériaux granulaires (50cm)
- Couche d'assise : GB3 (23 cm)
- Couche de roulement : BBSG (6 cm)

Variante environnementale

- Plateforme support PF2 : évacuation terres + apport matériaux granulaires recyclés (50cm)
- Couche d'assise : GB4 AE 40% (19 cm)
- Couche de roulement : BBSG tiède AE 20% (6 cm)

Analyse des résultats

-  Utilisation de matériaux recyclés pour la plateforme support
-  Utilisation de matériaux recyclés (agrégats d'enrobés)

Indicateur : émission de Gaz à Effet de Serre
(en tonnes équivalent CO2)

CO ₂			Emissions de gaz à effet de serre (t éq CO2)							
			Extraction des matériaux	Transports en amont	Fabrication des mélanges	Fret entrant sur le chantier	Mise en oeuvre	Fret sortant du chantier	Sous-total	Comparaison / Base
Solution de base	Route/VRD	1. Déblai	63.17	0	0	0	3.49	30.87	97.53	
		2. Couche de forme	19.7	0	0	32.58	13.89	0	66.15	
		3. Couche d'assise (GB3)	48.76	15.89	64.81	13.71	9.12	0	152.3	
		4. Couche de roulement (BBSG3)	15.66	4.29	18.96	3.59	2.49	0	42.99	
	Total	147.29	20.18	81.77	49.86	28.99	30.87	358.97		
Variante granulat recyclé	Route/VRD	1. Déblai	63.17	0	0	0	3.49	30.87	97.53	
		2. Couche de forme	11.02	0	0	32.58	13.89	0	57.48	
		3. Couche d'assise (GB4 R40 tiède)	27.19	7.92	52.08	11.33	7.47	0	105.99	
		4. Couche de roulement (BBSG3 R20 tiède)	12.96	3.43	15.74	3.59	2.49	0	38.21	
	Total	114.34	11.35	67.82	47.48	27.34	30.87	299.21	-16.65%	

Gains CO2 par rapport à la solution de base



Recyclage



Economie d'énergie



Economie de transport



Tutoriel en ligne



Tutoriel disponible en ligne [L'éco-comparateur SEVE-TP - Tutoriel – YouTube](#)



Playlist de vidéos de présentation de l'outil [SEVE-TP : L'outil de calcul de l'empreinte environnementale des chantiers de travaux publics. - YouTube](#)

La Feuille de Route Economie Circulaire

#TravauxPublics #ÉconomieCirculaire

AVEC LE SOUTIEN FINANCIER DE :



AVEC LE SOUTIEN TECHNIQUE DE :



La Feuille de Route Economie Circulaire

❖ Objectifs

- **Promouvoir l'économie circulaire dans les Travaux Publics** afin de limiter l'épuisement de la ressource naturelle
- **Aider les maîtres d'ouvrage et les collectivités** à répondre à leurs obligations réglementaires en matière de recyclage et évaluer leurs performances
- **Accompagner les entreprises de la filière** sur ces sujets à enjeux, **favoriser leur montée en compétences** afin qu'elles puissent, à leur tour, accompagner maîtres d'ouvrage et collectivités

❖ Nos partenaires

AVEC LE SOUTIEN FINANCIER DE :



AVEC LE SOUTIEN TECHNIQUE DE :



❖ Vos contacts



Lucile EVRARD

Chargée de mission Économie Circulaire

77-91-93-94

Pro : + 33 7 63 48 81 14

Mail : l.evrard@fnfp.fr



Camille SANJIVY

Chargée de mission Économie

Circulaire 75-78-92-95

Pro : + 33 6 68 40 33 80

Mail : c.sanjivy@fnfp.fr

Merci pour votre attention

#TravauxPublics #ÉconomieCirculaire

AVEC LE SOUTIEN FINANCIER DE :



AVEC LE SOUTIEN TECHNIQUE DE :



Fédération Régionale
des Travaux Publics Ile-de-France
9 rue de Berri - 75008 Paris
www.frtpidf.fr



Journée
“Les freins et les leviers
de l'économie circulaire et de la construction décarbonée”
26 novembre 2024

**Valorisation de terres excavées
pour la conception d'un liant géopolymère**

Laurent GAUTRON

Laboratoire Géomatériaux et Environnement (LGE, EA 4508)

Université Gustave Eiffel

Laurent.Gautron@univ-eiffel.fr



Terres excavées ...

L'impact de l'activité humaine ...

Sur notre planète, le total des matériaux (sols et roches) déplacés par l'homme est du même ordre de grandeur que celui de l'érosion naturelle

40 milliards de tonnes déplacées annuellement par les hommes
Soit 20 kg par jour et par personne

60 milliards de tonnes déplacées par érosion (essentiellement fluviale et marine)
30 milliards de tonnes déplacées par les volcans

source BRGM différents rapports 2020-2022

Chantier du Grand Paris Express ...

- Chantier de 2015 à 2030 ... mise en service entre 2024 et 2030
- Liaisons de connexion entre banlieues et avec Paris
- 5 nouvelles lignes automatiques / 68 nouvelles gares
- 200 km de tracé ... majoritairement souterrain
- Maîtrise d'Ouvrage Société Grand Paris (+ RATP)

LES DATES DE MISES EN SERVICE
DU GRAND PARIS EXPRESS



Source rapport SGP
schéma de gestion et de valorisation des déblais, mai 2022

Chantier du Grand Paris Express ...

- Estimation du volume de déblais générés par la construction des tunnels, des gares et autres ouvrages

47 millions de tonnes (base 2 tonnes par mètre cube)
soit 9500 piscines olympiques de 2 m de profondeur
- BTP en Ile de France générant environ 30 millions de tonnes de déchets (terres, gravats et autres déchets du bâtiment)
- Déblais des chantiers du GPE participant à une augmentation moyenne de 10% à 20% selon les années, du volume annuel des déchets produits en Ile de France, sur la période considérée.



Chantier du Grand Paris Express ...

- Gestion des déblais pour réduire les nuisances pour riverains et environnement
- Orientations stratégiques pour la maîtrise de la gestion des déchets
Schéma d'évacuation des déblais autour de trois axes
 - ✓ Traçabilité des déblais jusqu'à leur exutoires finaux
 - ✓ Recours autant que possible à des modes de transport alternatifs à la route
 - ✓ Objectif de valorisation des déblais fixé à 70% de l'ensemble des déblais excavés

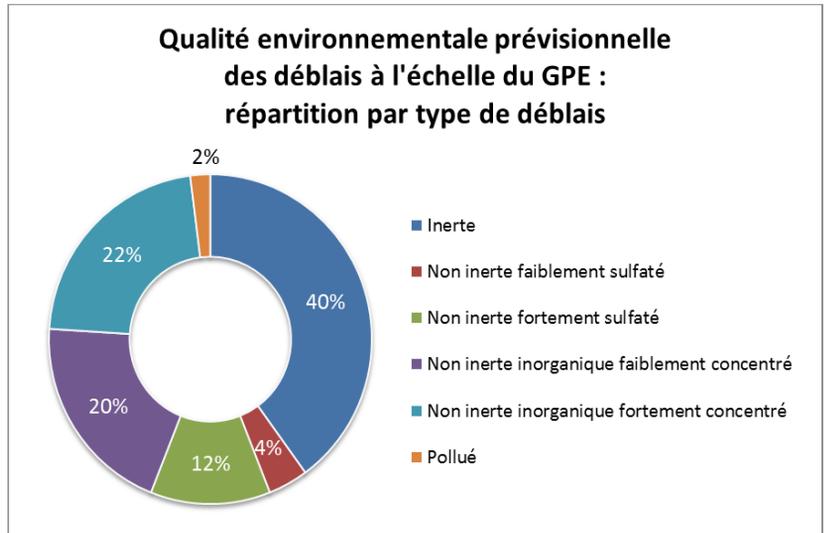
Chantier du Grand Paris Express ...

Qualité des terres excavées ... études et analyses depuis 2014

Plus de 60% des déblais
avec caractère « non inerte »

au sens de l'arrêté ministériel
du 12 décembre 2014

Sulfates, fraction soluble
Fluorures, chlorures
COT, métaux ...

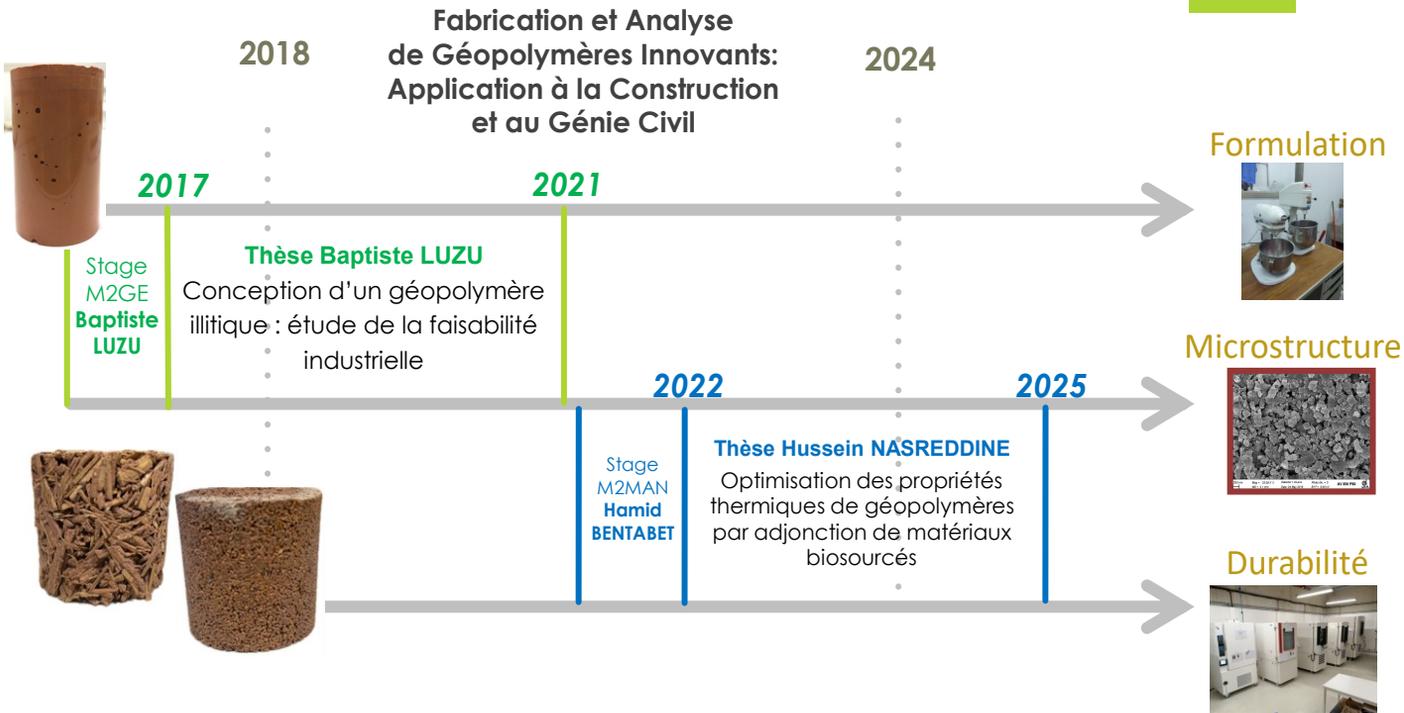


Chantier du Grand Paris Express ...

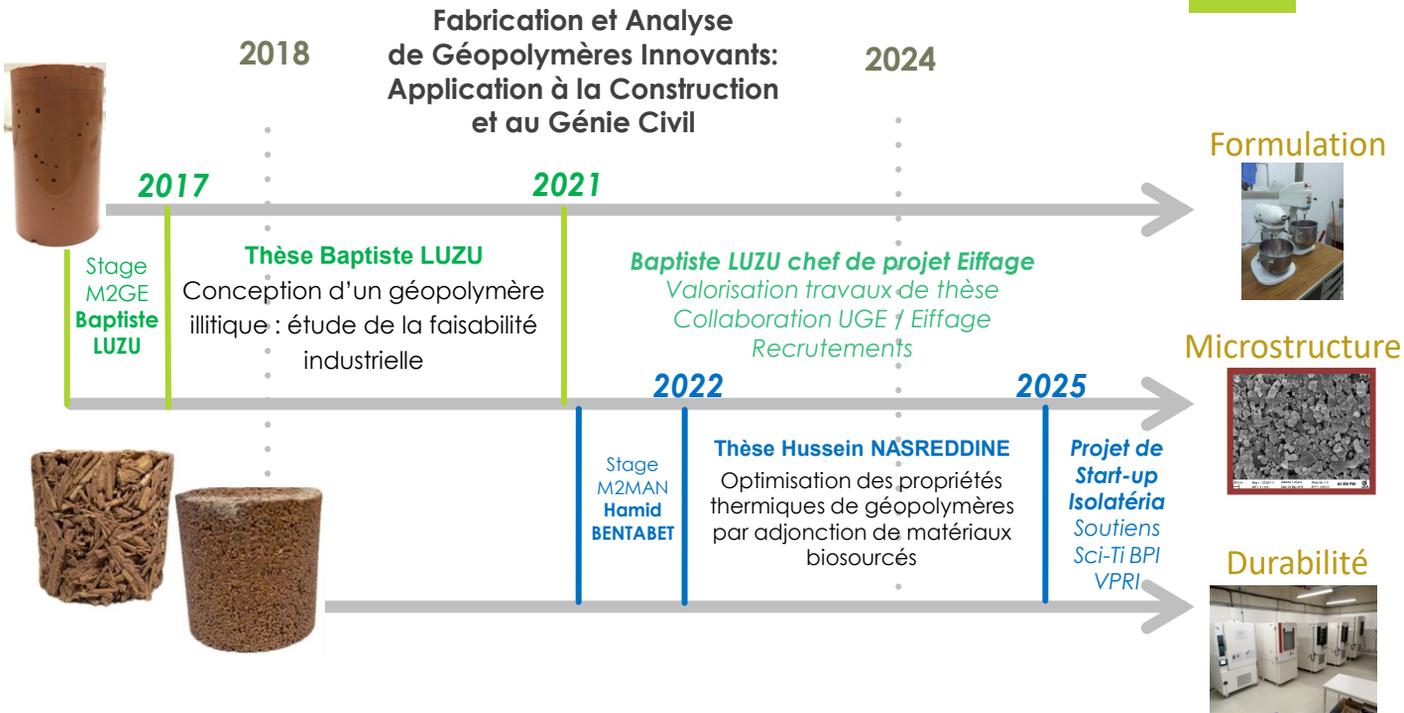
- Directive Cadre Européenne (2008)
Loi de Transition Energétique (2015)
Plan Régional de Prévention et de Gestion des Déchets (PRPGD)
d'Ile-de-France
- Limiter le stockage des déblais en sites agréés
- Développer la réutilisation, le réemploi
- Développer la transformation en éco-produits et éco-matériaux
- Valorisation matière (transformation) vs Valorisation volume (réutilisation)

Vers de nouveaux matériaux écologiques à base de terres excavées

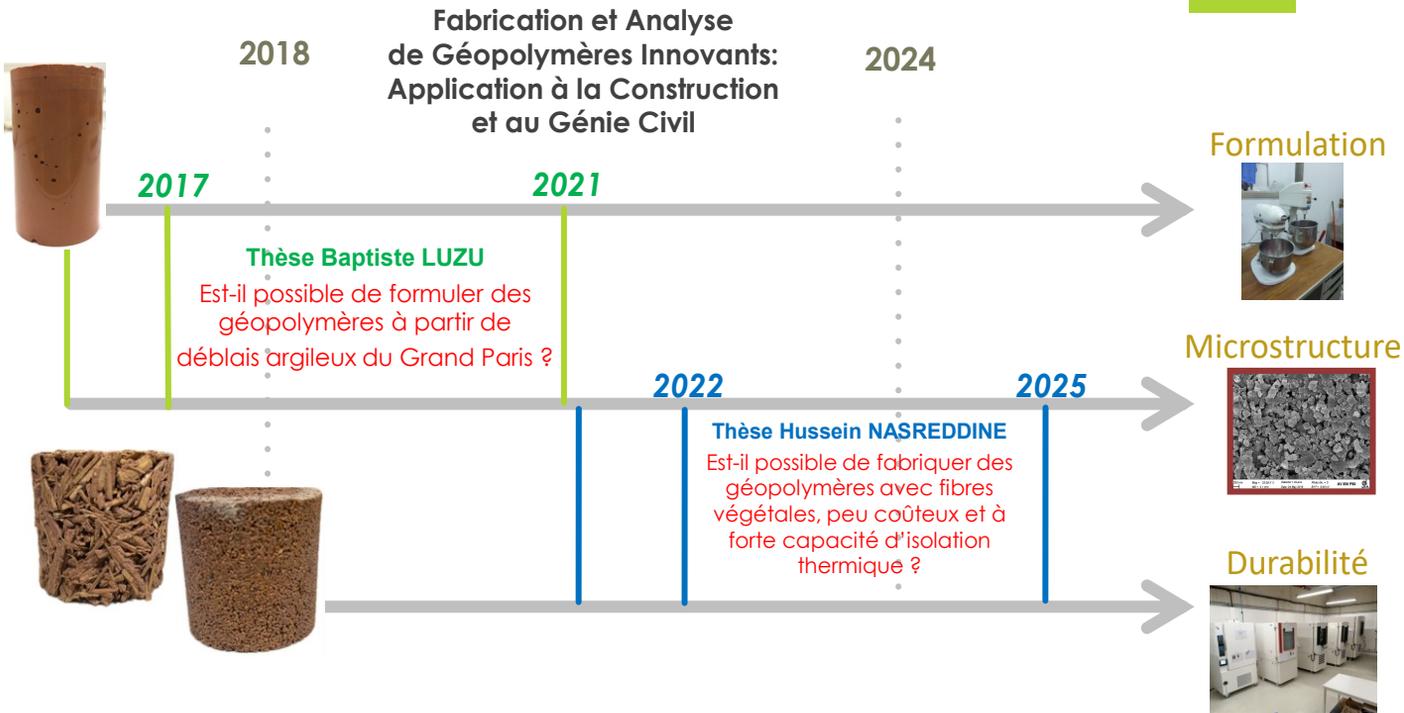
- **Géopolymères**: alternative aux ciments et bétons avec faible émission de CO_2
- **Géopolymères**: fabrication simple par mélange d'un précurseur solide avec une solution alcaline
- Précurseurs aluminosilicatés nécessitant une activation en général: metakaolin, cendres volantes, laitiers ...
- Argiles, précurseurs potentiels pour fabriquer des géopolymères
- Argiles illitiques de composition proche de la muscovite $(\text{Al}_2(\text{Si}_3\text{Al})(\text{O}_{10})(\text{OH})_2\text{K})$, argiles les plus abondantes dans les sols des pays tempérés



Collaboration avec les départements MAST-MCD et GERS-SRO (UGE) et le laboratoire CERTES (UPEC)
 Assia DJERBI + Thouraya SALEM + Myriam DUC + Nicolas DUJARDIN



Collaboration avec les départements MAST-MCD et GERS-SRO (UGE) et le laboratoire CERTES (UPEC)
Assia DJERBI + Thouraya SALEM + Myriam DUC + Nicolas DUJARDIN



Collaboration avec les départements MAST-MCD et GERS-SRO (UGE) et le laboratoire CERTES (UPEC)
Assia DJERBI + Thouraya SALEM + Myriam DUC + Nicolas DUJARDIN

Quelques mots sur les géopolymères ...

Mécanisme

Faible émission de CO₂

Matériaux
Aluminosilicatés



- Dissolution
- Gélification
- Réorganisation
- Polycondensation
- Durcissement



Geopolymer

Solution
Alcaline

Quelques mots sur les géopolymères ...

Mécanisme

Faible émission de CO₂

Matériaux Aluminosilicatés

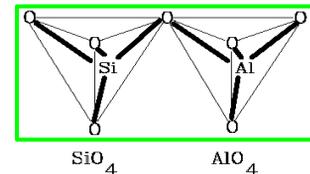
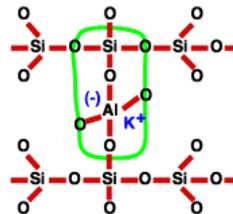


- Dissolution
- Gélification
- Réorganisation
- Polycondensation
- Durcissement



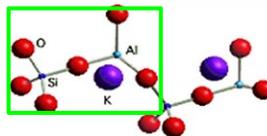
Geopolymer

Solution Alcaline



Forte résistance mécanique

Très forte résistance au feu



Thèse Baptiste LUZU (2017-2021)

- Site de Romainville: extraction d'argiles vertes à partir d'une carrière de gypse
- Une des deux formations argileuses principales du Bassin Parisien



Argile Verte:

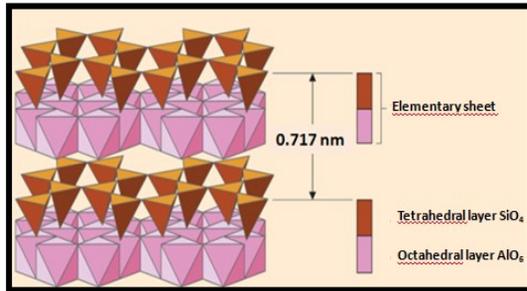
- **Illite+Muscovite: 53%**
- Quartz: 22%
- Carbonates: 8%
- Feldspaths: 7%
- Autres: 10%

Valorisations possibles:

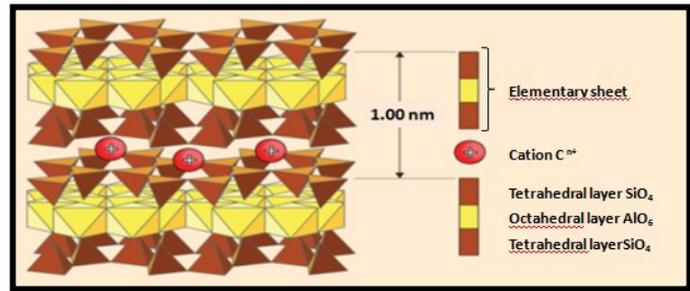
- Cru de cimenterie
- Construction en terre crue
 - Remblais courants
- Fabrication de briques et de tuiles

- **Géopolymères**

Verrou scientifique et technique



Structure Kaolinite (TO)
 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$



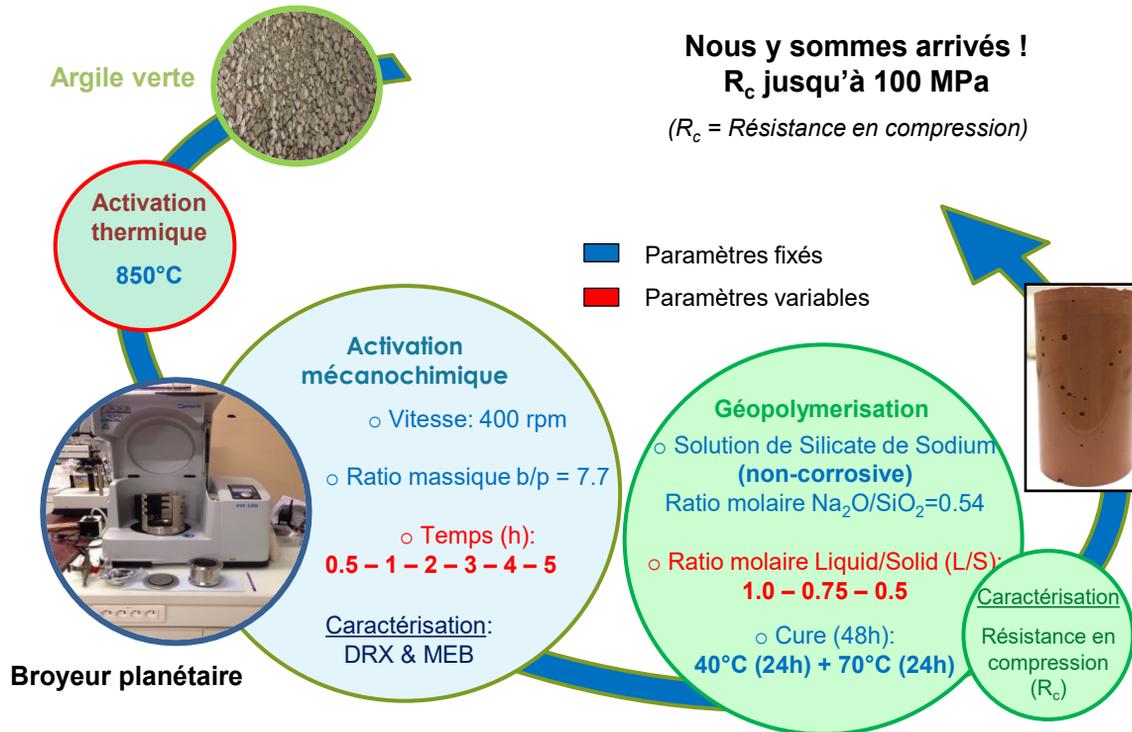
Structure Illite (TOT)
 $(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$

Activation thermique de l'argile illitique pas suffisante (deshydroxylation)

**Nécessité d'une étape supplémentaire:
Activation mécano-chimique (broyage)**

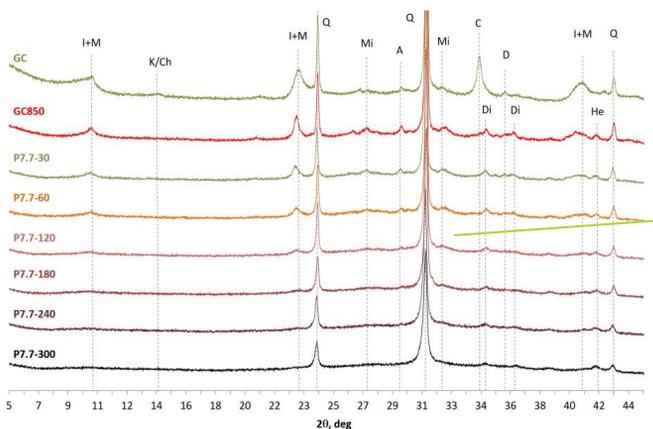
Concevoir des géopolymères à base d'argiles / Faisabilité industrielle

Thèse de Baptiste LUZU



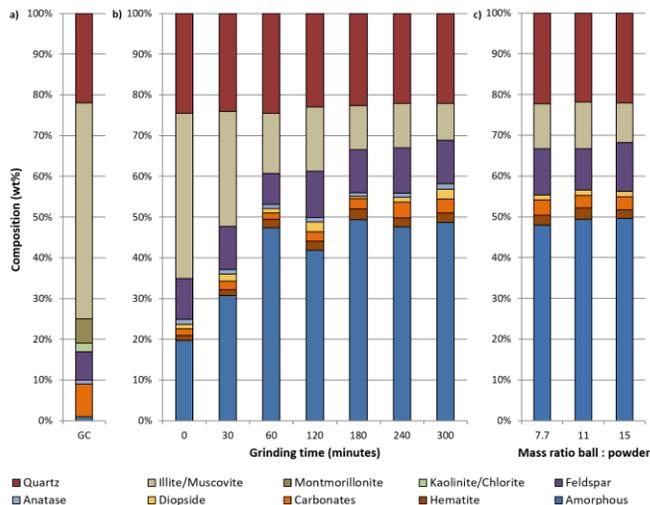
Concevoir des géopolymères à base d'argiles / Faisabilité industrielle

Thèse de Baptiste LUZU



Clichés DRX d'argile verte, avant et après différentes activations thermique ou mécano-chimique

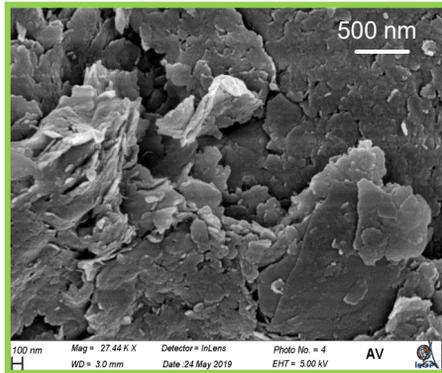
I+M : illite/muscovite, *K/Ch* : kaolinite/chlorite, *Q* : quartz, *Mi* : microcline, *C* : calcite, *D* : dolomite, *Di* : diopside, *A* : anatase, *He* : Hematite.



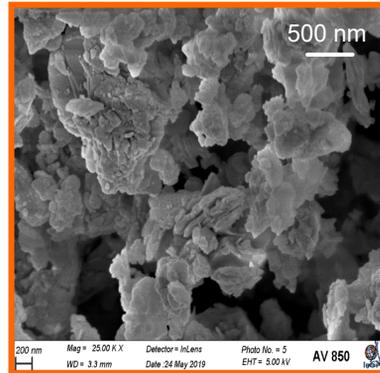
Quantification minéralogique (à partir de l'analyse Rietveld)

Activation mécano-chimique

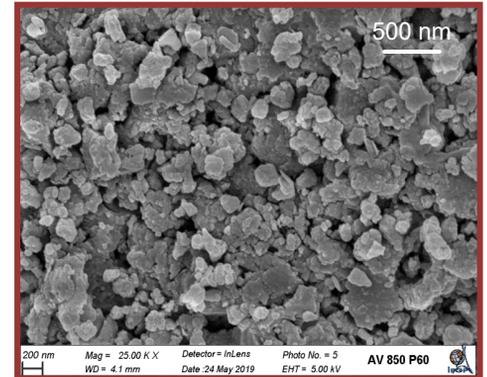
Microscopie Electronique Analytique à Balayage (ASEM-FEG)



Argile verte brute



Argile verte calcinée (850°C)

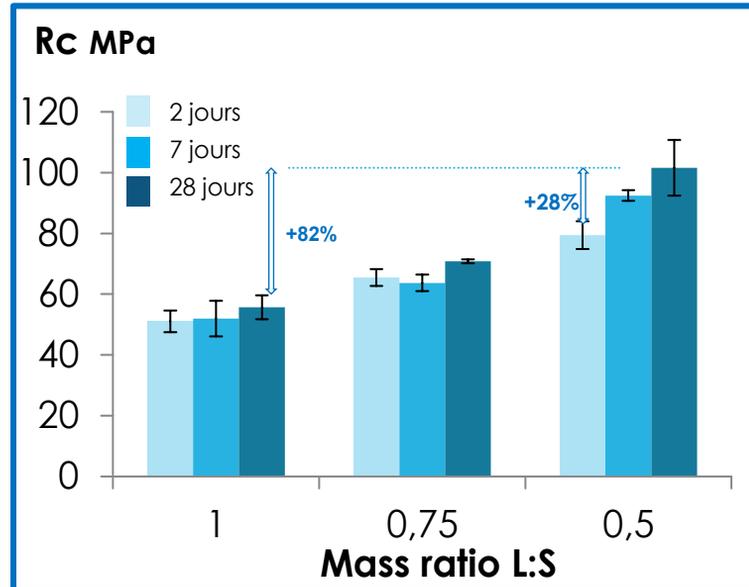
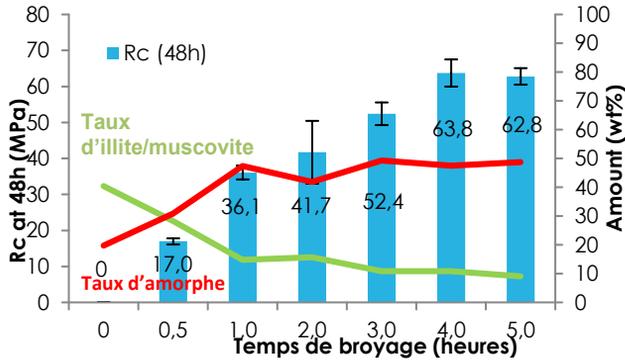


Argile verte broyée 1h

- Après la calcination à 850°C, les feuillets argileux semblent plus compacts
- La taille des particules diminue après 1h de broyage

Concevoir des géopolymères à base d'argiles / Faisabilité industrielle

Thèse de Baptiste LUZU



R_c max: 102 MPa (28 jours)
L/S = 0.5

Concevoir des géopolymères à base d'argiles / Faisabilité industrielle

Thèse de Baptiste LUZU



Essais attaque acide par immersion prolongée dans H_2SO_4

+ Essais incendie normalisés sur mortiers (collaboration Fichet)

Concevoir des géopolymères à base d'argiles / Faisabilité industrielle

Thèse de Baptiste LUZU



Essais attaque acide par immersion prolongée dans H_2SO_4

+ Essais incendie normalisés sur mortiers (collaboration Fichet)



Changement d'échelle calcination de 150 kg d'argile verte (collaboration avec CTP)

Concevoir des géopolymères à base d'argiles / Faisabilité industrielle

Thèse de Baptiste LUZU

Pour en savoir plus ...

*Un article dans
Applied Clay Science*

Applied Clay Science 258 (2024) 107445

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Applied Clay Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/clay

ELSEVIER

Research Paper

High performance illitic clay-based geopolymer: Influence of thermal/mechanical activation on strength development

Baptiste Luzu^a, Myriam Duc^{a,*}, Assia Djerbi^b, Laurent Gautron^a

^a Université Gustave Eiffel, LGE, Champs-sur-Marne 77420, France
^b Université Gustave Eiffel, MCD, Champs-sur-Marne 77420, France
^c Université Gustave Eiffel, GERS-SRO, Champs-sur-Marne 77420, France
^d Eiffage Génie Civil, Recherches et Développement, Vélizy-Villacoublay, France

 **Université
Gustave Eiffel**

UNIVERSITÉ
— PARIS-EST

ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES, INGÉNIERIE et ENVIRONNEMENT

Thèse pour obtenir le grade de
DOCTEUR de l'Université Paris-Est

Spécialité : SCIENCES des MATÉRIAUX

Présentée par
Baptiste LUZU

Conception d'un géopolymère illitique : étude de la faisabilité industrielle

*Le mémoire de thèse
de Baptiste LUZU*

Journée
AMI ECCD
26 nov 2024

Thèse présentée et soutenue à Champs-sur-Marne, le 8 février 2021

Concevoir des géopolymères à base d'argiles / Faisabilité industrielle

Thèse de Baptiste LUZU

Vers des applications possibles...

⑲ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

① **N° de publication :** **3 094 008**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)
② **N° d'enregistrement national :** **19 02917**

⑤ **Int Cl^B :** **C 04 B 14/10 (2019.01), C 04 B 28/00, C 04 B 12/04,
C 04 B 28/26**

*Un brevet
déposé en 2019*

⑫ **BREVET D'INVENTION** **B1**

⑤ **liant géopolymérique à base d'argile TOT chargée.**

⑲ **Date de dépôt :** 21.03.19.

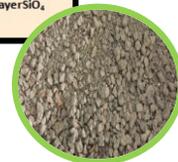
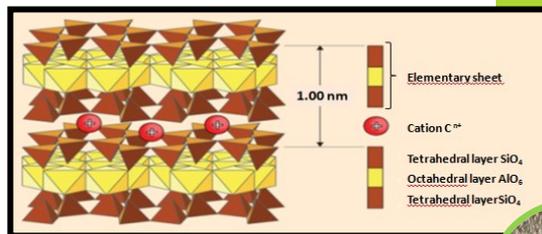
⑥ **Références à d'autres documents nationaux
apparentés :**

Description

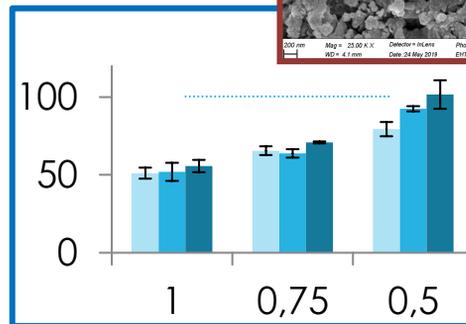
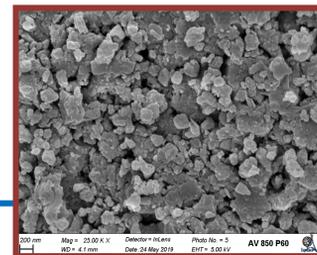
Titre de l'invention : liant géopolymérique à base d'argile TOT chargée

Domaine technique

[0001] La présente invention relève du domaine des matériaux de construction. Plus précisément, l'invention concerne un liant géopolymérique à base d'argile dite « TOT » chargée. Ce liant permet la fabrication de coulis, mortier et béton avec une faible empreinte environnementale.



*Merci pour
votre attention*







Annexes

PARAMÈTRE	VALEUR LIMITE À RESPECTER exprimée en mg/kg de matière sèche
As	0,5
Ba	20
Cd	0,04
Cr total	0,5
Cu	2
Hg	0,01
Mo	0,5
Ni	0,4
Pb	0,5
Sb	0,06
Se	0,1
Zn	4
Chlorure (1)	800
Fluorure	10
Sulfate (1)	1 000 (2)
Indice phénols	1
COT (carbone organique total) sur éluat (3)	500
FS (fraction soluble) (1)	4 000

- (1) Si le déchet ne respecte pas au moins une des valeurs fixées pour le chlorure, le sulfate ou la fraction soluble, le déchet peut être encore jugé conforme aux critères d'admission s'il respecte soit les valeurs associées au chlorure et au sulfate, soit celle associée à la fraction soluble.
- (2) Si le déchet ne respecte pas cette valeur pour le sulfate, il peut être encore jugé conforme aux critères d'admission si la lixiviation ne dépasse pas les valeurs suivantes : 1 500 mg/l à un ratio L/S = 0,1 l/kg et 6 000 mg/kg de matière sèche à un ratio L/S = 10 l/kg. Il est nécessaire d'utiliser l'essai de percolation NF CEN/TS 14405 pour déterminer la valeur lorsque L/S = 0,1 l/kg dans les conditions d'équilibre initial ; la valeur correspondant à L/S = 10 l/kg peut être déterminée par un essai de lixiviation NF EN 12457-2 ou par un essai de percolation NF CEN/TS 14405 dans des conditions approchant l'équilibre local.
- (3) Si le déchet ne satisfait pas à la valeur limite indiquée pour le carbone organique total sur éluat à sa propre valeur de pH, il peut aussi faire l'objet d'un essai de lixiviation NF EN 12457-2 avec un pH compris entre 7,5 et 8,0. Le déchet peut être jugé conforme aux critères d'admission pour le carbone organique total sur éluat si le résultat de cette détermination ne dépasse pas 500 mg/kg de matière sèche.

ANNEXE II

CRITÈRES À RESPECTER POUR L'ACCEPTATION DE DÉCHETS NON DANGEREUX INERTES SOUMIS À LA PROCÉDURE D'ACCEPTATION PRÉALABLE PRÉVUE À L'ARTICLE 3

1° Paramètres à analyser lors du test de lixiviation et valeurs limites à respecter :
Le test de lixiviation à appliquer est le test normalisé NF EN 12457-2.

ANNEXE II

CRITÈRES À RESPECTER POUR L'ACCEPTATION DE DÉCHETS NON DANGEREUX INERTES SOUIS À LA PROCÉDURE D'ACCEPTATION PRÉALABLE PRÉVUE À L'ARTICLE 3

2° Paramètres à analyser en contenu total et valeurs limites à respecter :

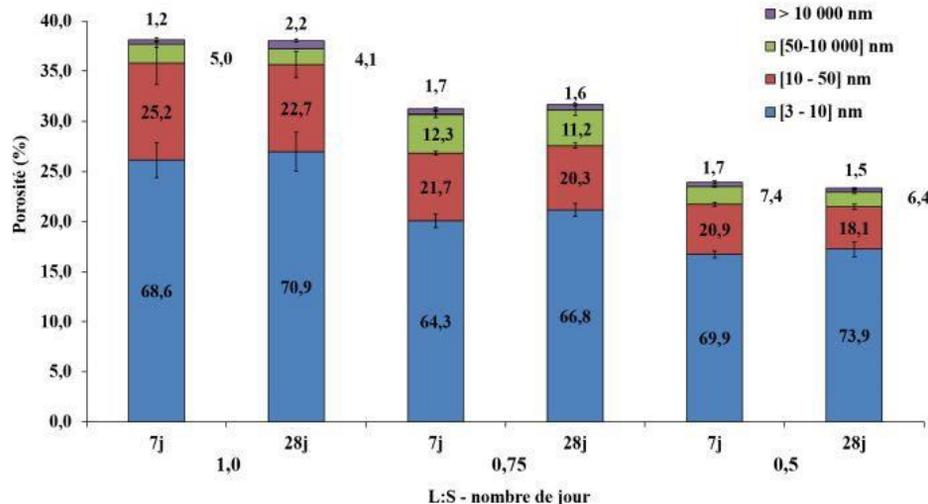
PARAMÈTRE	VALEUR LIMITE À RESPECTER exprimée en mg/kg de déchet sec
COT (carbone organique total)	30 000 (1)
BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes)	6
PCB (polychlorobiphényles 7 congénères)	1
Hydrocarbures (C10 à C40)	500
HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques)	50

(1) Pour les sols, une valeur limite plus élevée peut être admise, à condition que la valeur limite de 500 mg/kg de matière sèche soit respectée pour le carbone organique total sur éluat, soit au pH du sol, soit pour un pH situé entre 7,5 et 8,0.

Thèse Baptiste LUZU

Geopolymerization

Distribution porale



diminution de la porosité totale évaluée (MIP) avec le L/S.

augmentation de la fraction porale [3-10 nm] supposée liée au gel de géopolymère

augmentation de la Rc entre 7 et 28 jours probablement due à la formation retardée de gel diminuant le diamètre des pores

Distribution porales des pâtes de géopolymère en fonction du ratio massique L/S et du temps. Les géopolymères testés sont issus de la réaction entre 1AV850P7,7-240 et Na54.

Thèse Baptiste LUZU

Conclusion

- **Make a 100% illitic clay geopolymer with high mechanical strength**

It's possible, reduced costs!

Best Rc = 102 MPa at 28 days

($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2=0.54$ - L/S=0.5 – accelerated cure)

- Mechanochemical activation is a highly efficient method to improve the precursor's reactivity
 - This improvement seems to be due to:
 - the increase of the amorphous content correlated with the decrease of illite/muscovite amount
 - the decrease of the size of the particles (until 1 hour of grinding)
 - the aggregation of the particles (after 1 hour of grinding)

Thèse Baptiste LUZU

Les essais d'adaptation du procédé d'amorphisation de l'argile verte à l'échelle semi industrielle ont été réalisés avec la collaboration:

- 1) de **l'entreprise CTP** disposant d'un parc complet de machines permettant le traitement de matière minérale
- 2) du **groupe Fichet** avec lequel les essais au feu ont été menés sur les géopolymères.

L'objectif de cette étude était d'amorphiser 150 kg d'argile verte par calcination en four rotatif suivi d'un broyage.

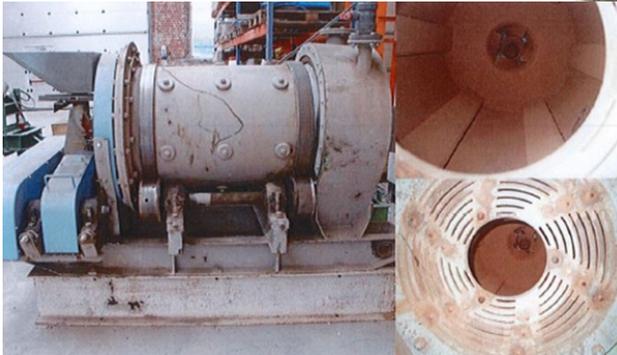
Thèse Baptiste LUZU



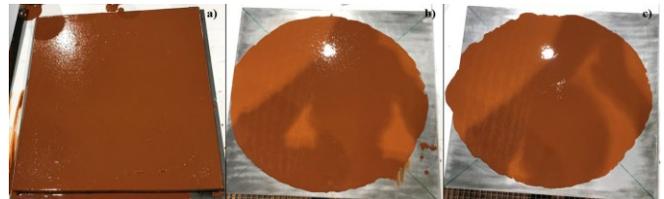
Mélangeurs Eirich utilisés pour la pelletisation ;
a) unité de laboratoire et b) unité pilote.



Four rotatif de laboratoire utilisé pour les essais d'orientation n°2 à 4 et
la calcination des 150 kg d'argile verte.



Broyeur à boulet de type
KUD



Essai d'étalement au mini cône d'Abrams pour les différentes formules

Thèse Baptiste LUZU

V Conception et étude de la durabilité des mortiers géopolymères :

V.1 Choix des formules retenues pour la fabrication des mortiers

V.2 Caractérisation mécanique des mortiers et pâtes de références

V.3 Étude des indicateurs de durabilité

V.3.1 Porosité accessible à l'eau

V.3.2 Porosimétrie par intrusion de mercure

V.3.3 Perméabilité au gaz

V.4 Essai de résistance à la chaleur

V.5 Attaque acide

V.6 Essai en condition d'incendie

V.6.1 Essais préliminaires

V.6.2 Adaptation et optimisation du procédé d'activation à l'échelle semi-industrielle

V.6.2.1 Pelletisation de l'argile verte initiale

V.6.2.2 Calcination

V.6.2.3 Broyage

V.6.3 Conception et fabrication des dalles (40×500×500 mm)

Concevoir des géopolymères composites à base de matériaux biosourcés

Performances thermiques optimisées / Applications industrielles

Thèse de Hussein NASREDDINE



Les précurseurs
metakaolin Argical, Argicem

Les solutions alcalines
 Na_2SiO_4 , K_2SiO_4 , NaOH



Les matériaux biosourcés
sciure de bois, chanvre,
miscanthus



Concevoir des géopolymères composites à base de matériaux biosourcés

Performances thermiques optimisées / Applications industrielles

Thèse de Hussein NASREDDINE

Différents paramètres testés:

type de précurseur, type de fibres végétales, taux de fibres végétales,
type de solution alcaline, ratio liquide / solide, cure, adjuvants

Deux tests pour contrôler les performances:

Résistance en compression



Mesure de conductivité thermique (hot disks)



Concevoir des géopolymères composites à base de matériaux biosourcés

Performances thermiques optimisées / Applications industrielles

Thèse de Hussein NASREDDINE

Différents paramètres testés:

type de précurseur, type de fibres végétales, taux de fibres végétales,
type de solution alcaline, ratio liquide / solide, cure, adjuvants

Deux tests pour contrôler les performances:

Résistance en compression



Mesure de conductivité thermique (hot disks)



Des analyses pour mieux comprendre et optimiser les propriétés obtenues

Fibres:

- FTIR
- Distribution taille particules
- Densité
- Absorption d'eau

Géopolymères:

- Ouvrabilité
- pH
- Porosimétries eau ou mercure,
- Microscopie électronique à balayage analytique

2 articles publiés (ACS, 2024; CBM, 2024)

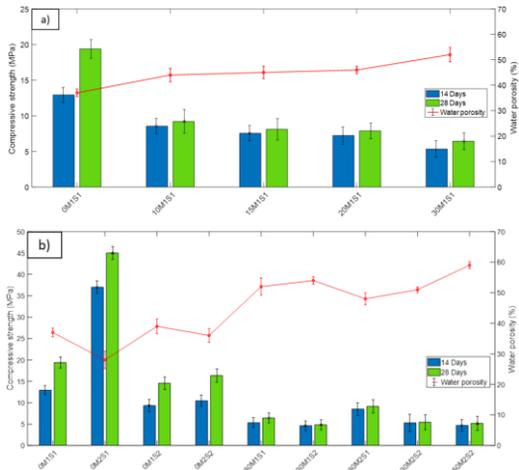
1 proceeding (FIB, 2024)

Concevoir des géopolymères composites à base de matériaux biosourcés

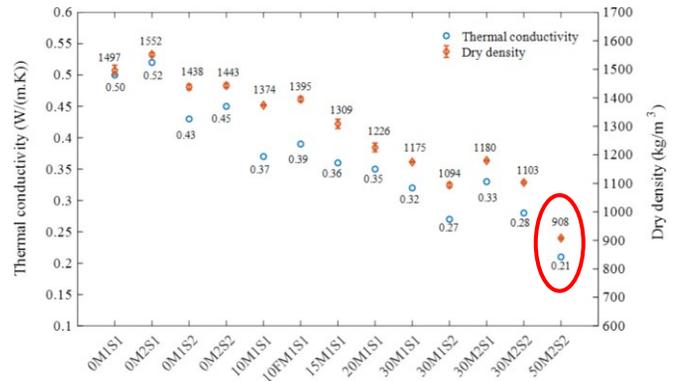
Performances thermiques optimisées / Applications industrielles

Thèse de Hussein NASREDDINE

Principaux résultats avec les fibres de Miscanthus



Relation entre R_c et porosité / effets du taux de fibres, du précurseur et de la solution alcaline



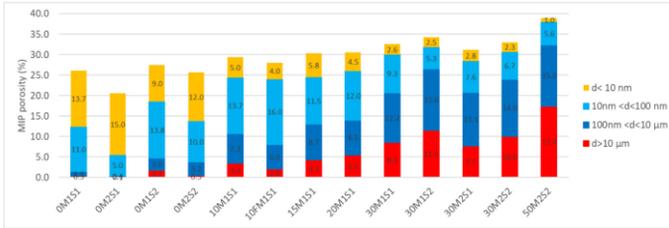
Evolution de la conductivité thermique en fonction de différents paramètres (taux de fibres, type de précurseur, type de solution, cure)

Concevoir des géopolymères composites à base de matériaux biosourcés

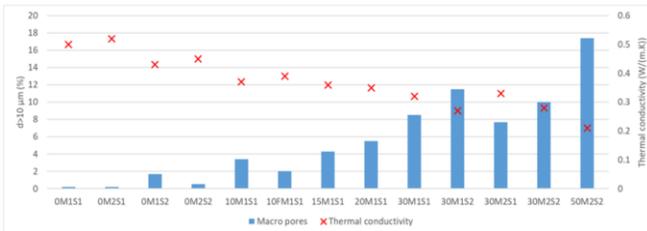
Performances thermiques optimisées / Applications industrielles

Thèse de Hussein NASREDDINE

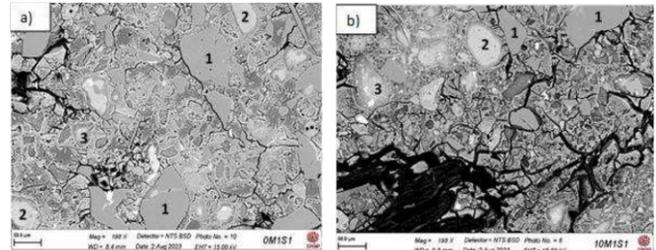
Principaux résultats avec les fibres de Miscanthus



Distribution des pores dans les géopolymères produits

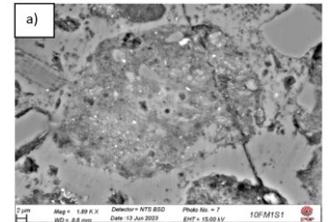


Relation entre les macro-pores ($d > 10 \mu\text{m}$) et la conductivité thermique



Images à même échelle du même échantillon (a) sans fibres, (b) avec fibres

Mise en évidence des corrélations entre porosité, texture et propriétés obtenues



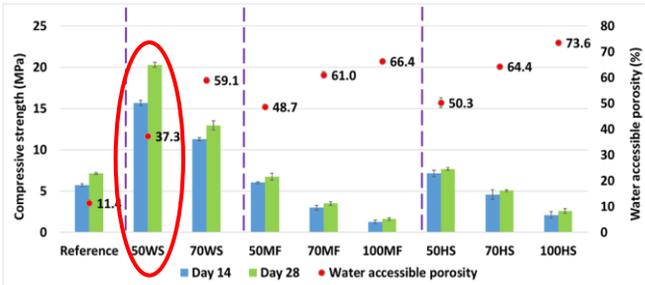
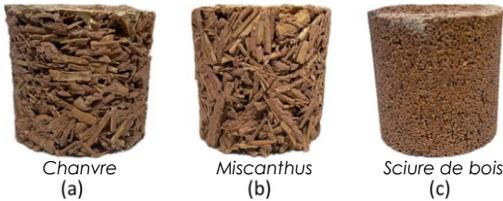
Images d'un grain à un stade plus avancé de réaction avec la solution alcaline

Concevoir des géopolymères composites à base de matériaux biosourcés

Performances thermiques optimisées / Applications industrielles

Thèse de Hussein NASREDDINE

Principaux résultats avec différentes fibres (chanvre, miscanthus, sciure de bois)



Sample	ρ (kg.m ⁻³)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	α (mm ² .s ⁻¹)	c_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Reference	1441 ± 8.33	0.49	0.44	773
50WS	1190 ± 5.61	0.37	0.38	818
70WS	915 ± 5.05	0.32	0.33	1060
50MF	870 ± 7.04	0.30	0.32	1078
70MF	676 ± 4.87	0.25	0.24	1541
100MF	493 ± 15.44	0.17	0.19	1815
50HS	800 ± 17.02	0.28	0.30	1167
70HS	590 ± 10.32	0.20	0.21	1614
100HS	450 ± 3.15	0.14	0.16	1944

1) Très bonne isolation thermique avec un taux élevé de fibres (miscanthus et chanvre)
100g MK + 200g SA + 100g Fibres

2) R_c très grande pour les géopolymères à base de sciure de bois

Concevoir des géopolymères composites à base de matériaux biosourcés

Performances thermiques optimisées / Applications industrielles

Thèse de Hussein NASREDDINE

Principaux résultats avec différentes fibres (miscanthus, chanvre, sciure de bois)

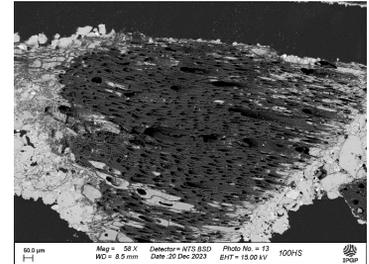
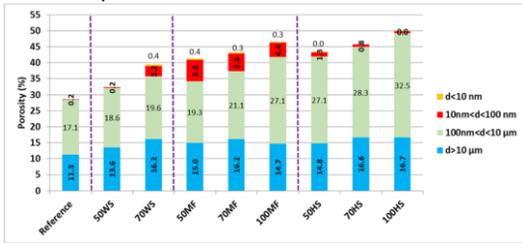


Image d'un échantillon de géopolymère avec chanvre montrant la porosité de ces fibres

Distribution des pores dans les géopolymères produits

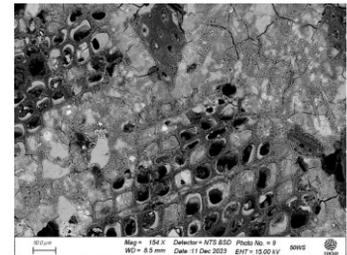
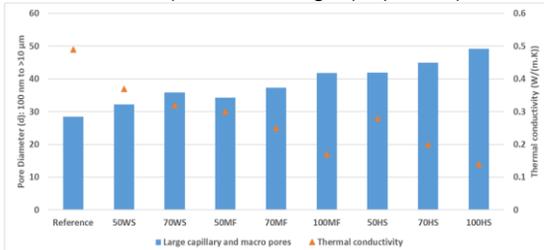


Image d'un échantillon de géopolymère avec sciure de bois montrant la très bonne liaison entre fibre et matrice

Relation entre macro-pores ($d > 10 \mu\text{m}$), pores capillaires ($d > 100 \text{ nm}$) et conductivité thermique



Concevoir des géopolymères composites à base de matériaux biosourcés
Performances thermiques optimisées / Applications industrielles
Thèse de Hussein NASREDDINE

En route vers les applications industrielles ...

Lauréat concours i-PhD (BPI)

Demi-Finaliste Concours ClimateLaunchPad (BofA)

Dossier sélectionné programme Sci-Ty (*prématuration*)

Fabrication et certification de panneaux d'isolation thermique (échelle 1)

Dépôt de brevet(s) à partir des résultats de thèse

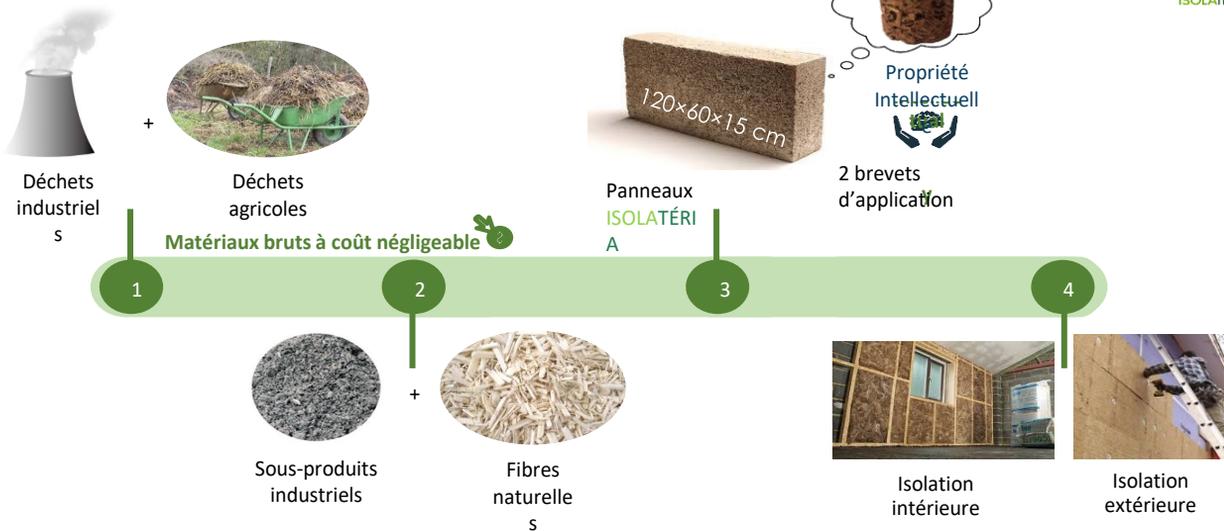
Création d'une start-up **Isolatéria**

Concevoir des géopolymères composites à base de matériaux biosourcés

Performances thermiques optimisées / Applications industrielles

Thèse de Hussein NASREDDINE

En route vers les applications industrielles ...



Concevoir des géopolymères composites à base de matériaux biosourcés

Performances thermiques optimisées / Applications industrielles

Thèse de Hussein NASREDDINE

En route vers les applications industrielles ...

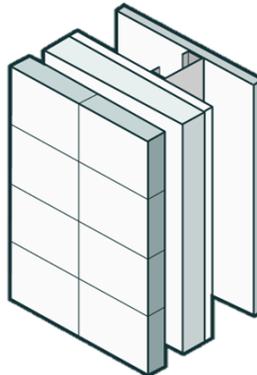
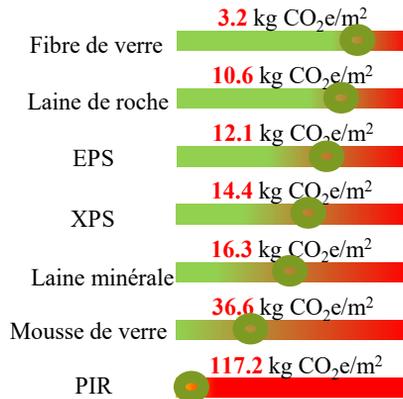
Conventionnel

Vs.

ISOLATÉRIA



(CO₂e = CO₂ equivalent)



0.9 kg CO₂e/m²

