



# Afoco

Créateur de Matériaux Alternatifs

## JOURNÉE TECHNIQUE 2021

**MIEUX VALORISER RÉGIONALEMENT  
LES MATÉRIAUX ALTERNATIFS**





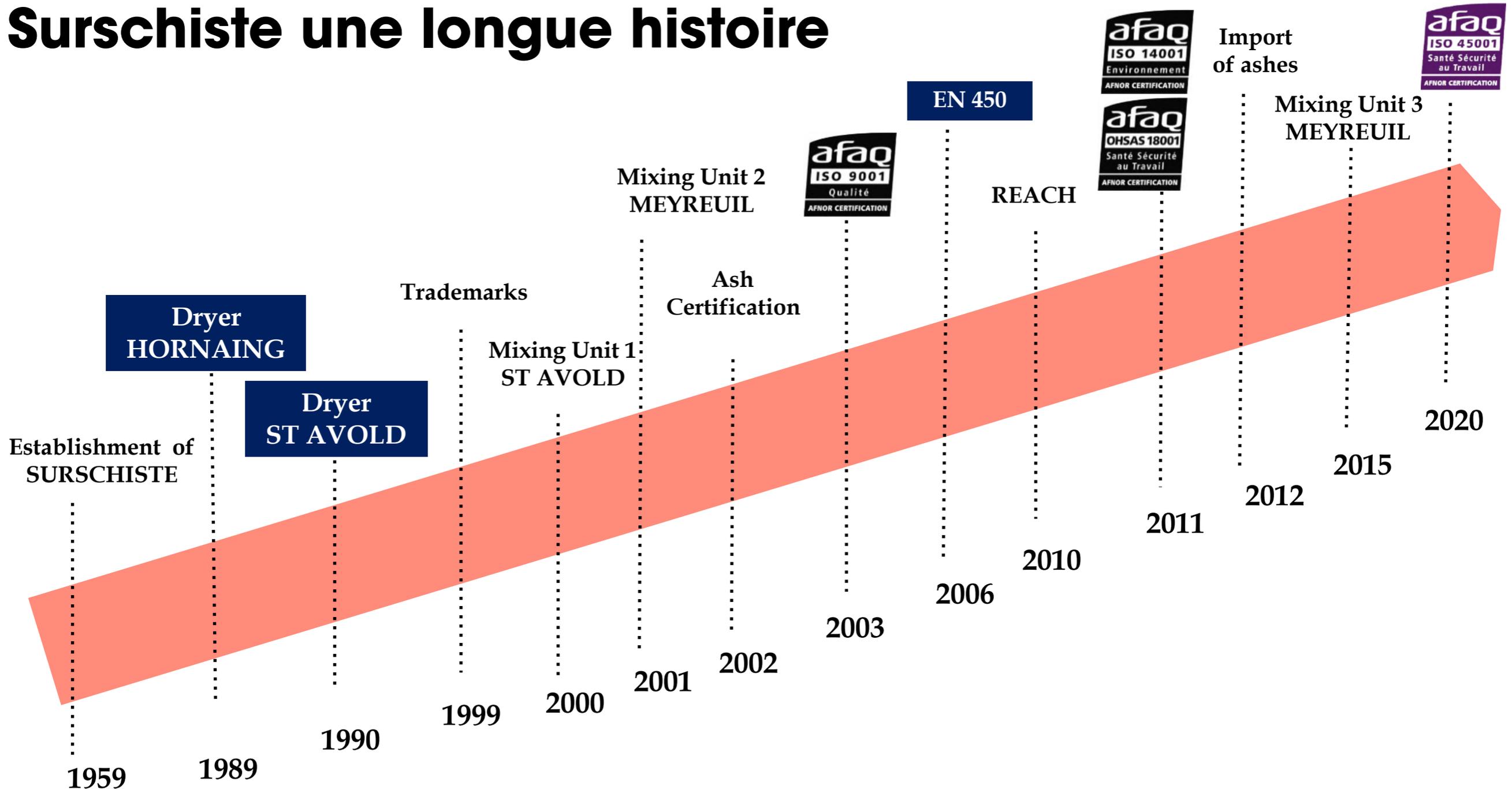
# Les cendres de co-combustion

Loïc DANEST  
SURSCHISTE

# Sommaire

- **Evolutions et perspectives**
- **Caractéristiques des cendres de co-combustion**
- **Les approches par usages**
  - Les bétons
  - Les coulis
  - En terrassement
  - Dans les liants hydrauliques routiers

# Surschiste une longue histoire



## STEAG Power Minerals becomes EP Power Minerals



### Germany

**POWER MENTI**

EP Energo Mineral

**MPS**  
MINERALplus STORX

Mineral plus

Minex

**HÖLTKEN**  
KUNSTSTOFFFERTIGUNG KUNSTSTOFFGROSSHANDEL

### France & Benelux

SURSCHISTE

*Euroment*

### United Kingdom

**pm**  
POWER MINERALS

### Eastern Europe (Poland und Czech Republic)

EP Energo Mineral

EP Resources

### Middle East and Asia

**HAWAR POWER MINERALS**  
حوار باور مينرالز

EP Power Minerals

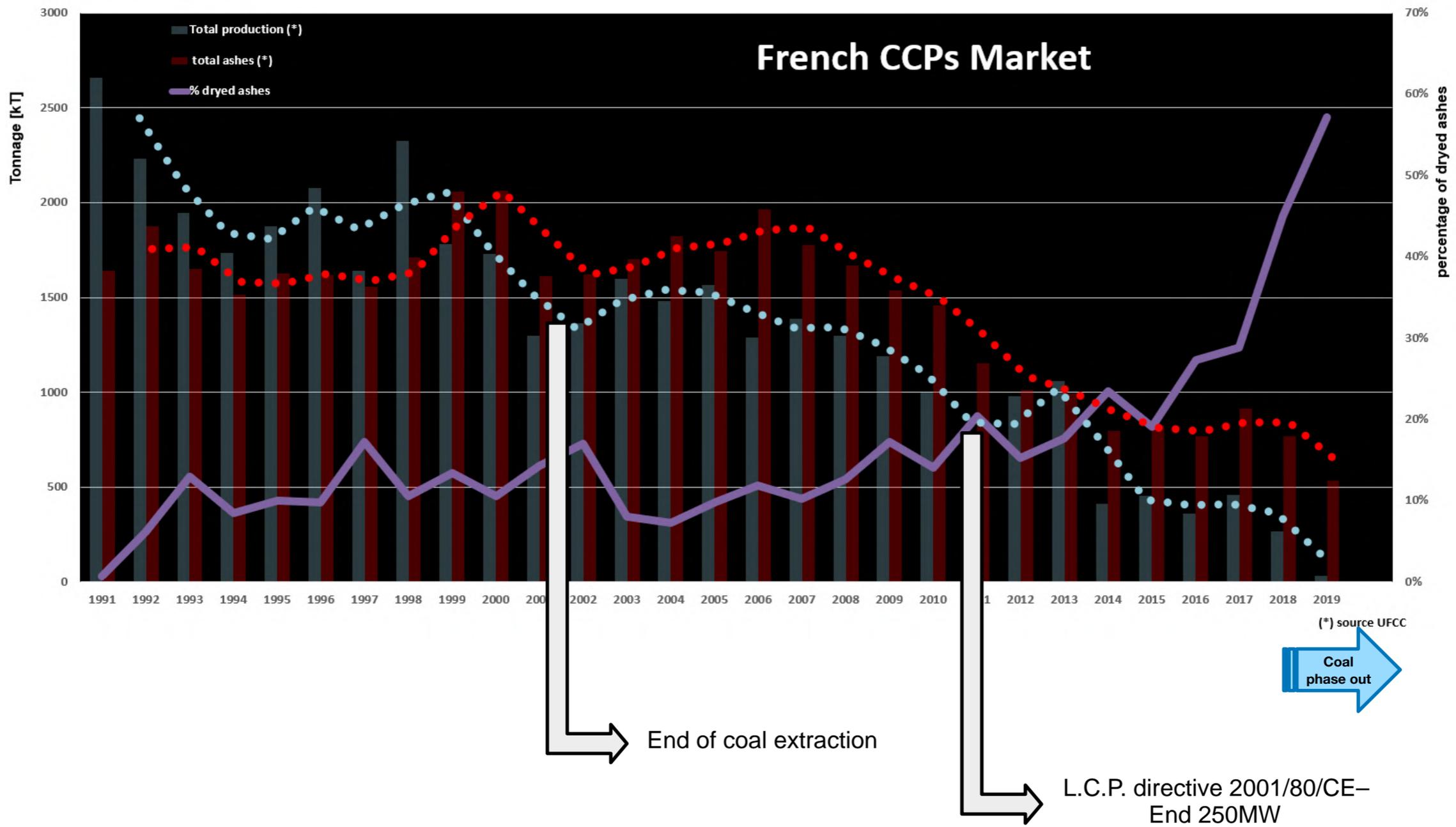
**HOANG SON**  
KIẾN TẠO GIÁ TRỊ VỮNG BỀN

### Iceland

Power Minerals Iceland ehf.

**EPPM**

# Evolution du marché des cendres depuis 30 ans



## Evolution de la ressource

- Exploitation des stocks historiques  
(depuis 30 ans en France qui se généralise ailleurs)
  - Des flux internationaux qui se mettent en place
  - Quelques centrales reconverties à la biomasse.
- 
- **Juin 2013 : démarrage de la conversion de l'unité 4 LFC de la centrale de Provence  
250MWe charbon 150 MWe (90% Biomasse  
+10% PCR)**



# Les cendres de co-combustion

à 90% Biomasse (wood chips, recycling chips) **2% cendres**

à 10% produit cendreux de récupération (stocks du Gard)

taux de cendre très élevé **70%**



SiO <sub>2</sub>	%	40-45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	6-8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	18-23
MgO	%	1,5-2,5
CaO total	%	8-15
CaO free	%	2-4
K <sub>2</sub> O	%	3-4
Chlorures	%	0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,4-0,7
SO <sub>3</sub>	%	2 -4

# Caractéristiques des cendres de co-combustion

## Campagne de caractérisation 2017-2018



Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Surface massique (cm <sup>2</sup> /g)
2,60	6400 - 8000

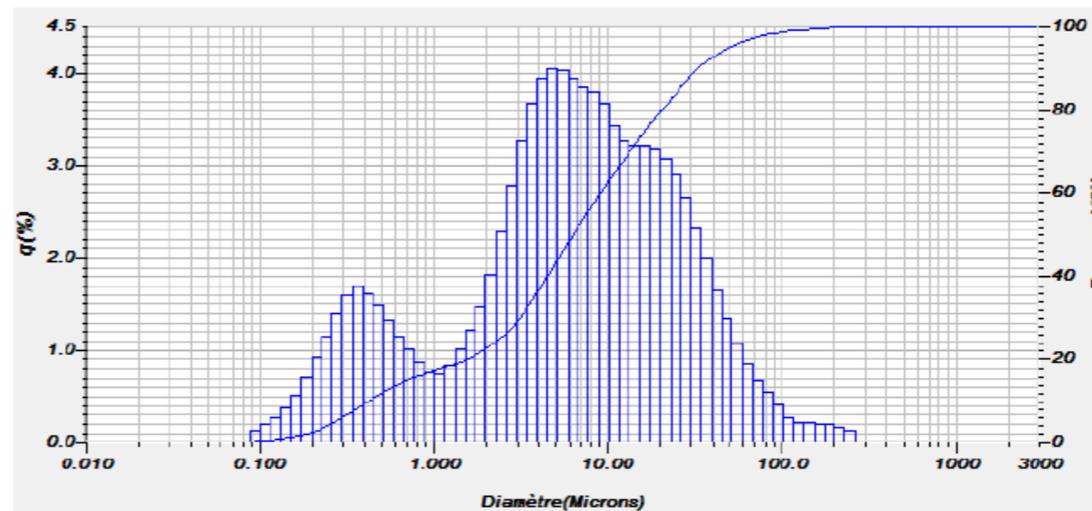


Fig. 1 : Illustration de la courbe granulométrique de l'échantillon de cendre 40386-1

- Des cendres pouzzolaniques
- Des caractéristiques très similaires aux cendres de charbon obtenues sur des chaudières analogues
- Possibilité de mettre à profit l'expérience de la Sodeline®

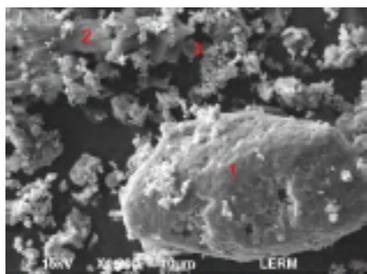


Fig. 11 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 40386-1  
Détail du matériau  
1 : sulfate de calcium, 2 : grain riche en carbone  
3 : cendre silico-alumino-calciq

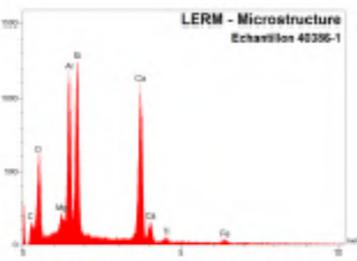


Fig. 12 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie du grain 3 de la figure précédente

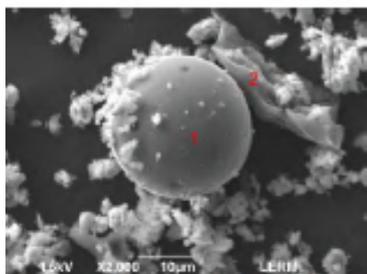


Fig. 13 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 40386-1  
Détail du matériau  
1 : cendre silico-alumino-calciq, 2 : grain riche en carbone

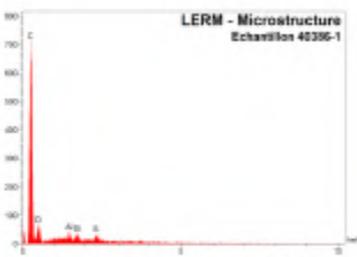


Fig. 24 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie du grain 2 de la figure précédente

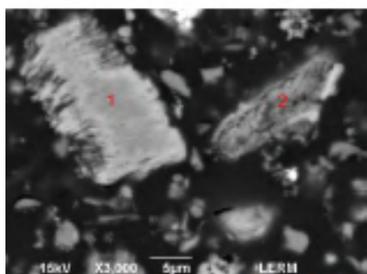


Fig. 35 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 40386-1  
Détail du matériau (section poêle à charbon rétrodiffusé)  
1 : sulfate double (Ca, Mg), 2 : sulfate de calcium

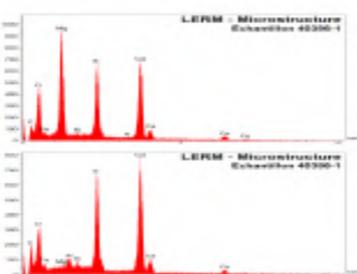
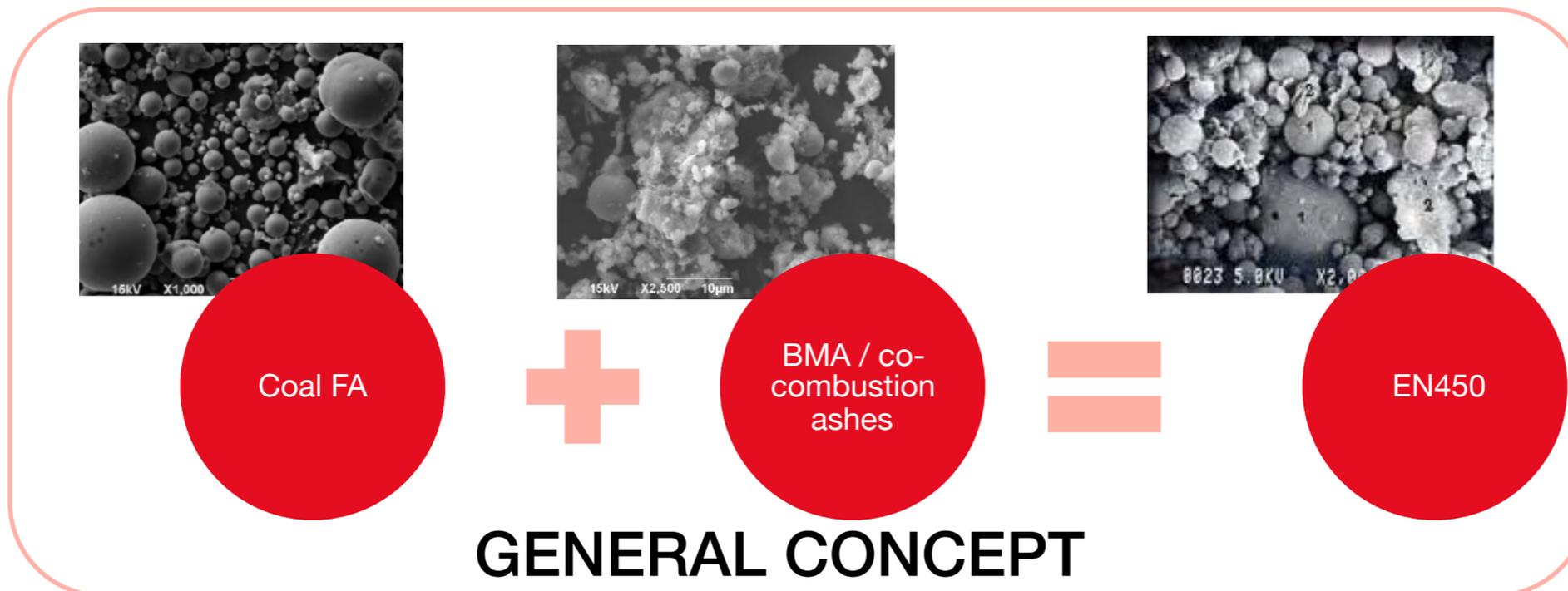


Fig. 45 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie des aux points 1 (spectre du haut) et 2 (spectre du bas) de la figure précédente

# Utilisation dans les bétons



## Déroulement du programme :

**Etape 1 (3 ans):** R & D : Caractérisations des cendres, détermination et évaluation des mélanges, essais sur mortiers et bétons

**Etape 2 (2 ans) :** discussion l'organisme de certification pour le marquage CE, Montage du dossier de demande (essais de type, autocontrôle, DoP...)

**Etape 3 :** audit initial puis période initiale - démarrage de la commercialisation

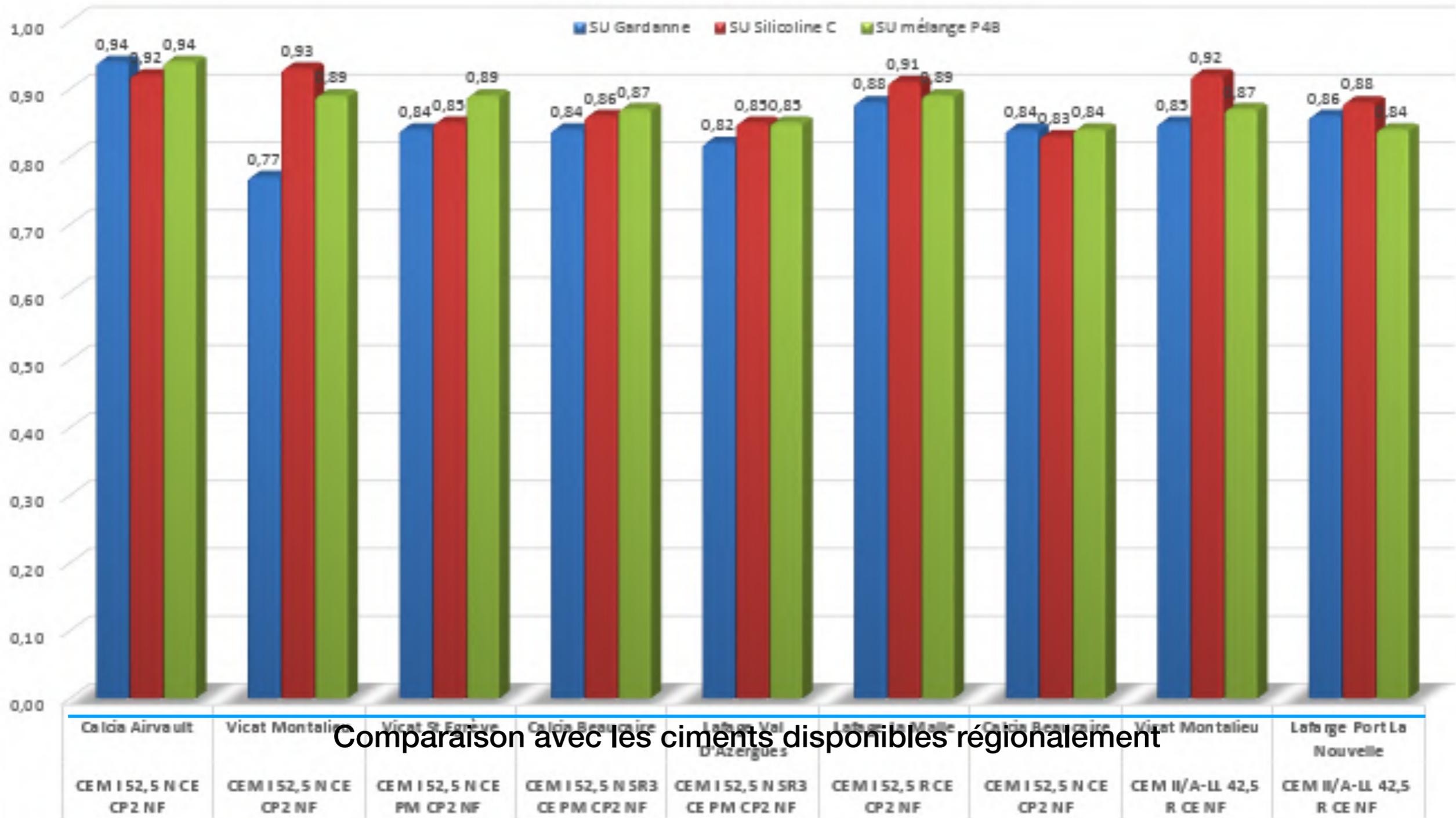


**Market introduction**

# Utilisation dans les bétons

	Spécification conformité EN 450-1/ Méthode d'essais	Exigences en fonction du type de CV		CV Silicoline Gardanne	CV Carling silicoline-C	CV Gardanne+CV P4B	
		CV issues de la combustion de charbon uniquement	CV issues de Co-combustion				
S P E C I F I C A T I O N S C H I M I Q U E S	<b>I2+J 75/25</b>	NF EN 196-1	>75%	0,87	0,88	<b>0,89</b>	
	<b>I9+J 75/25</b>	NF EN 196-1	>85%	1,01	1,00	<b>0,99</b>	
	<b>coefficient k</b>			0,6	0,6	<b>0,6</b>	
	<b>MT</b>	EN 1097-7 (pour traité)	blair < 200 kg/m <sup>3</sup>		2,33	2,40	<b>2,44</b>
	<b>stabilité 70/30</b>	NF EN 196-3		* Satisfait si CaO libre < 1,5% ou * si expansion < 10 mm	0,0 mm	0,0 mm	<b>0,0 mm</b>
	<b>TDP 75/25</b>	NF EN 196-3		< 28% TDP du ciment t6main	215 min (témoin 220 min)	225 min (témoin 220 min)	<b>240 min (témoin 220 min)</b>
	<b>Eau nécessaire au gâchage %</b>	EN 450-1 Annexe B (pour traité)	< 95% pour finesse de catégorie S		98	100	<b>97</b>
	<b>Finesse %</b>	EN 451-2 (pour traité)	Catégorie N: refus 0,45µm < 40% Catégorie S: refus 0,45µm < 12%		24,4	22,7	<b>19,5</b>
	<b>Perde au feu %</b>	NF EN 196-2	Catégorie A: < 5,0% Catégorie B: < 7,0% Catégorie C: < 9,0%		3,16 (2ème lot: 1,89%)	3,16	<b>3,17</b>
	<b>Chlorure %</b>	NF EN 196-2	< 0,10%		0,04	< 0,01	<b>0,07</b>
	<b>Sulfate %</b>	NF EN 196-2	< 3,0%		0,75	1,21	<b>1,94</b>
	<b>Al2O3 %</b>	EN 196-2 §5 (pour traité)			20,26	22,68	<b>19,98</b>
	<b>CaO %</b>	EN 196-2 §5 (pour traité)			3,46	4,36	<b>6,75</b>
	<b>Cr2O3 %</b>	EN 196-2 §5 (pour traité)			0,02	0,02	<b>0,02</b>
	<b>Fe2O3 %</b>	EN 196-2 §5 (pour traité)			7,61	6,66	<b>7,51</b>
	<b>K2O %</b>	EN 196-2 §5 (pour traité)			2,00	3,22	<b>2,5</b>
	<b>MgO %</b>	EN 196-2 §5 (pour traité)		< 4%	1,70	2,25	<b>1,98</b>
	<b>Mn2O3 %</b>	EN 196-2 §5 (pour traité)			0,07	0,12	<b>0,12</b>
	<b>Na2O %</b>	EN 196-2 §5 (pour traité)			1,37	0,52	<b>1,13</b>
	<b>P2O5 %</b>	EN 196-2 §5 (pour traité)			0,24	0,48	<b>0,37</b>
<b>SiO2 %</b>	EN 196-2 §5 (pour traité)			54,16	50,77	<b>49,92</b>	
<b>TiO2 %</b>	EN 196-2 §5 (pour traité)			0,92	0,96	<b>0,8</b>	
<b>Na2O eq %</b>	EN 196-2 §5 (pour traité)		< 5%	2,69	2,64	<b>2,77</b>	
<b>SiO2+Al2O3+Fe2O3 %</b>	calcul (pour traité)		> 70%	82,03	80,11	<b>77,41</b>	
<b>Teneur en phosphate soluble mg/l</b>	EN 450-1 Annexe C (pour traité)		< 5%	2,26 mg/l	1,46 mg/l	<b>2,68 mg/l</b>	
<b>CaO libre moyenne %</b>	EN 451-1 (pour traité)	si CaO libre > 1,5% faire stabilité		0,2	< 0,1	<b>1,3</b>	
<b>CaO réactif %</b>	EN 197-1 (pour traité)	* Satisfait si CaO total < 10% ou * CaO réactif < 10%		2,52	3,21	<b>4,56</b>	
<b>SiO2 réactif %</b>	EN 197-1 (pour traité)		> 25%	37,30	36,50	<b>34,36</b>	

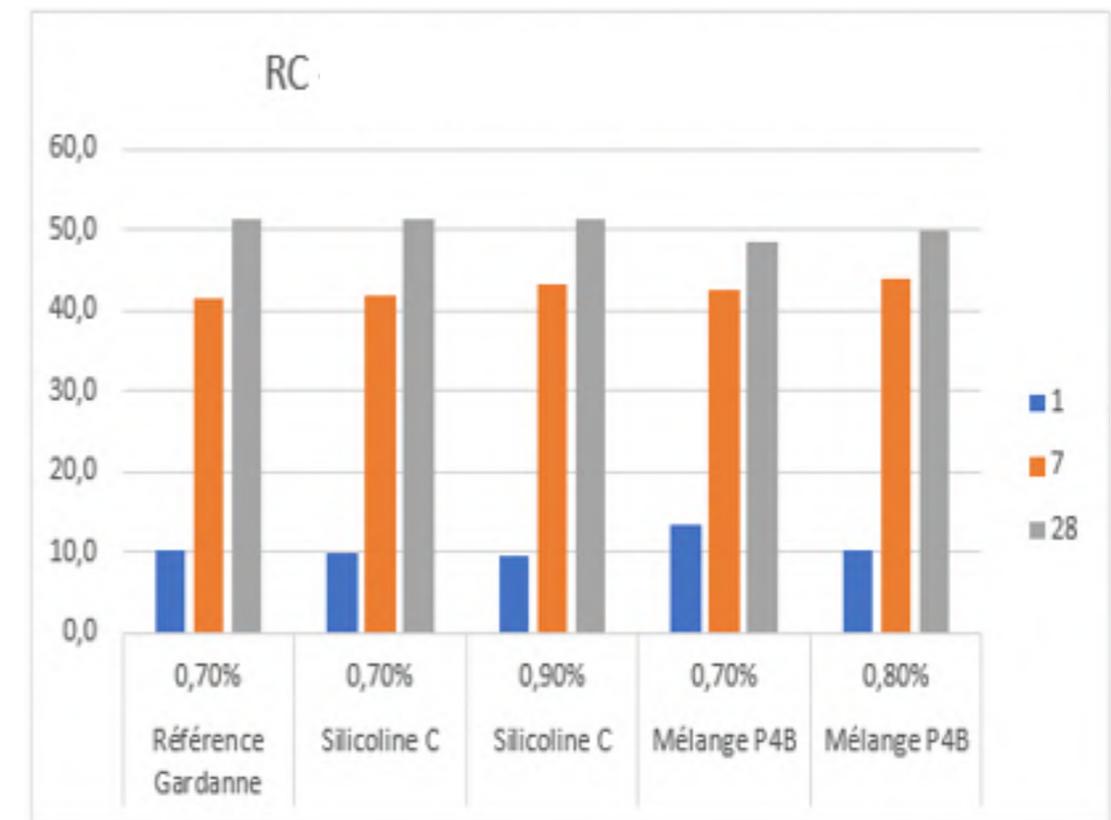
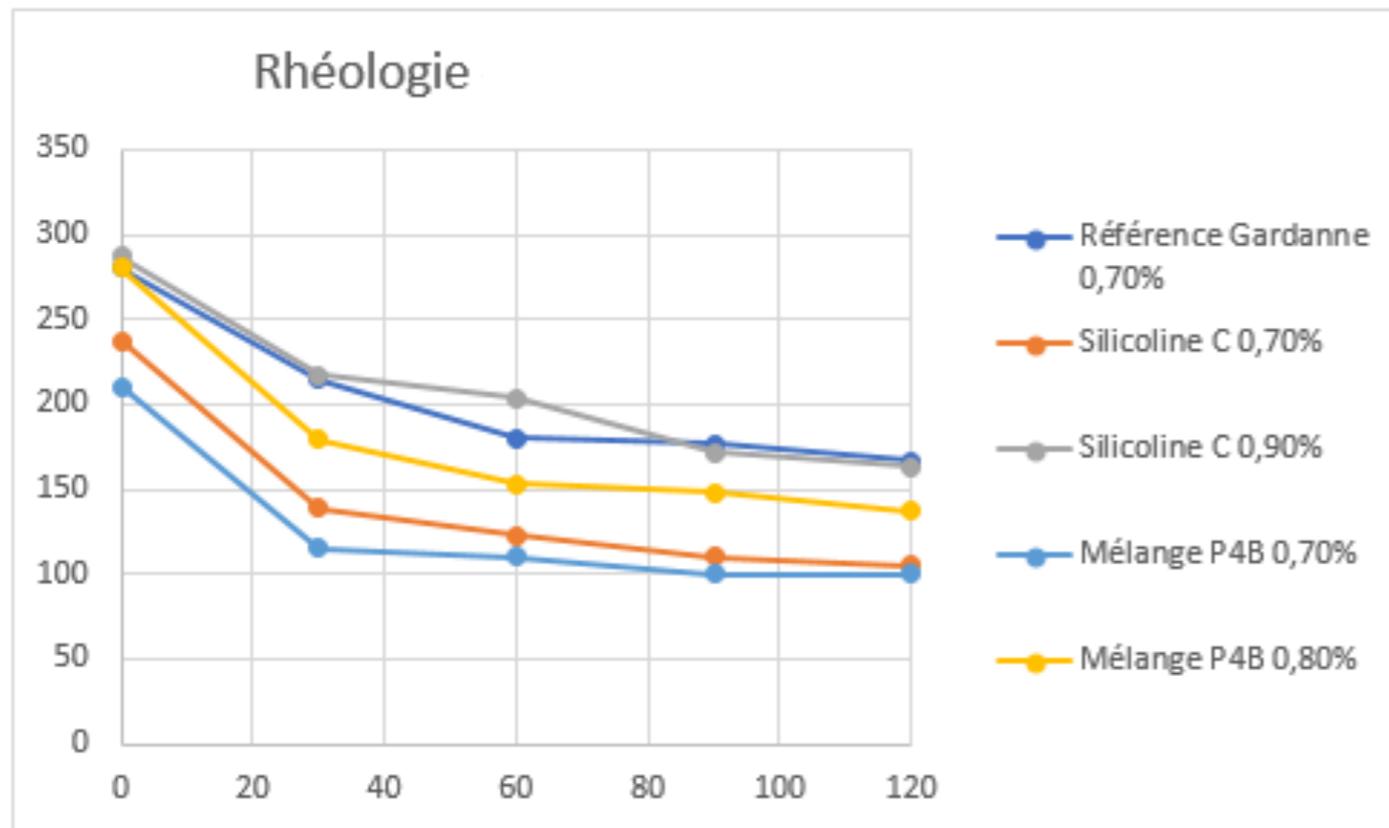
**70% ciment / 30% CV à 90j**



Comparaison avec les ciments disponibles régionalement

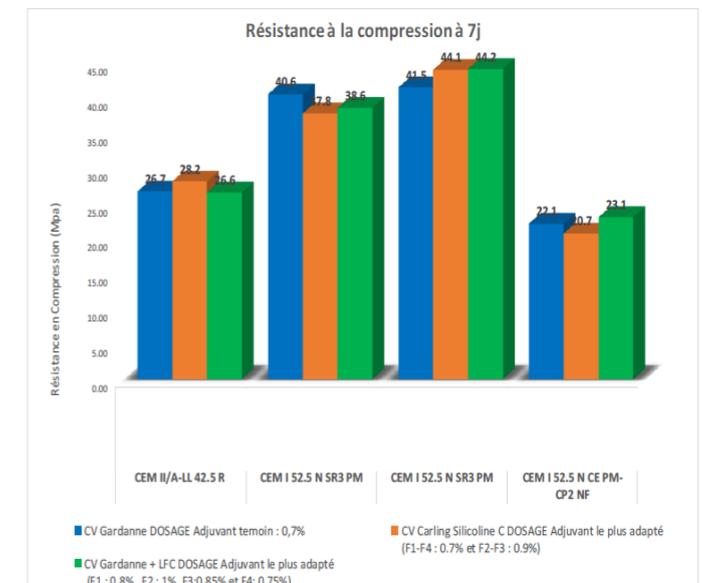
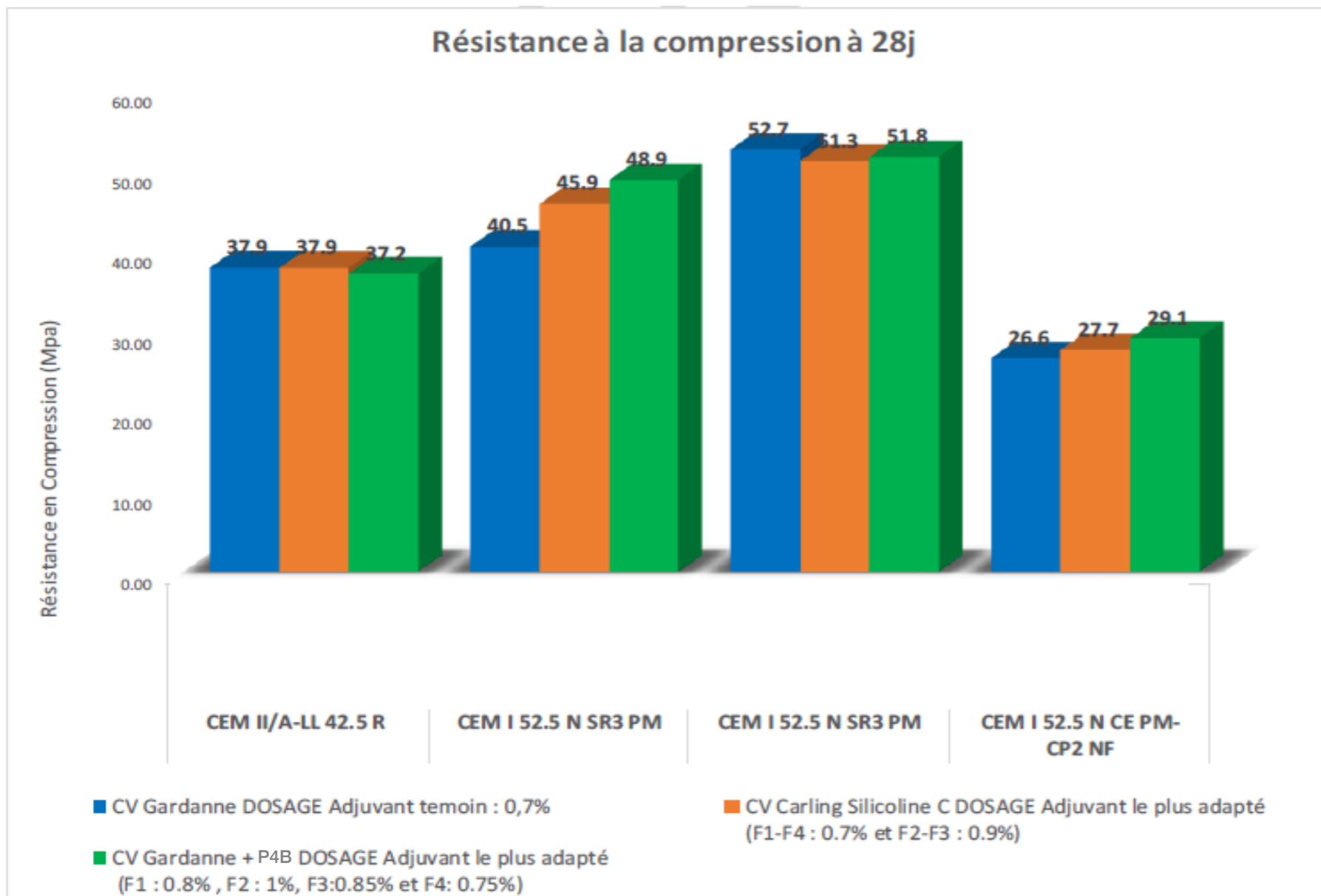
# Utilisation dans les bétons

## Phase 4: Essai Mortier



# Utilisation dans les bétons

## Phase 4: Essai Mortier - conclusions



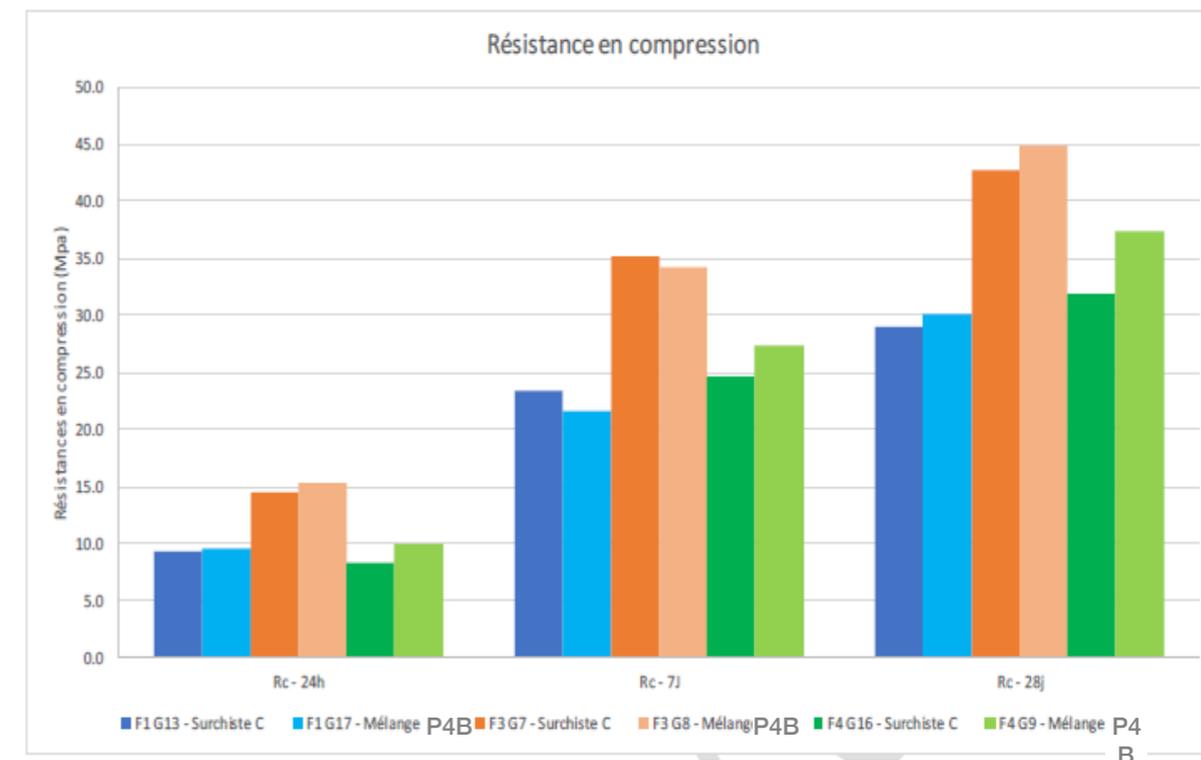
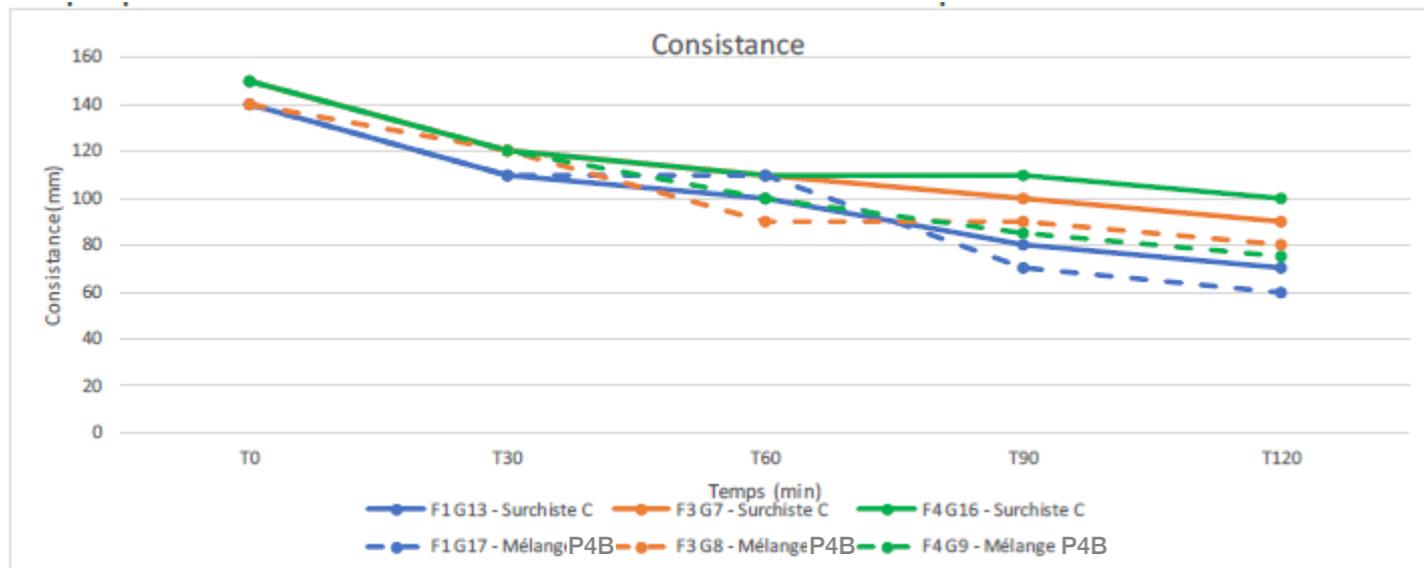
- **Après optimisation de l'adjuvantation le comportement à l'état frais est similaire aux formulations de référence**
- **Les performances mécaniques sont améliorées**

# Utilisation dans les bétons

## Phase 5: Essai Bétons

Essais réalisés sur éprouvette béton à partir mélange fabriqué industriellement

Nom de l'essai	Normes utilisées
Confection du béton destiné aux essais d'étude	NF P 18-404
Mesure d'étalement	NF EN 12350-8
Mesure de la masse volumique	NF EN 12350-6
Mesure de la teneur en air	NF EN 12350-7
Confection des éprouvettes	NF EN 12390-2
Mesure de la résistance à la compression	NF EN 12390-3



- Les comportements des mélanges industriels sur bétons sont similaires aux essais préliminaires en laboratoire

# Utilisation dans les coulis d'injection

## Développement de l'INJEX- C



Laboratoire  
Génie Civil  
et géo-Environnement  
Lille Nord de France

Réalisation de formulations bas carbone de coulis prêts à l'emploi à base de cendres de co-combustion.

E/L	MPa					temps Début prise	Etalement NF EN 445 (mm)	Cône Marsh Ajutage 4.76mm (s)	MV réelle (Kg/m3)	Ressuage	
	RC3	RC7	RC28	RC 90	RC180					2h %	24 h %
0,55	1.74	4.86	11.00	18.35	21.42	22h45mn	108	146s	1640	5	2.

## Utilisation dans les techniques de terrassement



- **Réalisation d'une plateforme expérimentale en 2018**
  - 10000 m<sup>2</sup>
  - Utilisation de cendres de co-combustion humides traitées au ciment
  - couche de forme revêtue destinée à un usage interne : vérification de l'acceptabilité environnementale en usage de TYPE 2

# Utilisation dans les techniques de terrassement



- **Vérification de l'aptitude au traitement**
- **Réalisation d'une planche d'essai**
- **Surveillance en phase chantier**
- **Contrôle de la qualité de la plateforme obtenue**

# Utilisation dans les techniques de terrassement

## ■ Réalisation d'une seconde plateforme en 2019



- Optimisation du processus de traitement en place
- Planche d'essai et contrôle de la qualité de la plateforme obtenue
- Validation acceptabilité environnementale



# Utilisation dans les techniques routière

**Développements de formulations de liants hydrauliques routiers à très faible empreinte carbone**

**Tests sur formules préliminaires sur pâtes pures**

**Essais sur mortiers, essais accélérés sur sols (7 jours à 40°C)**

**Etudes de traitement ( matériaux liés, sols) en laboratoire à 20°C**

**Optimisation des formules → 25 formules de LHR testées**

**Résultats très prometteurs - En phase de développement**

# Conclusions

- Les cendres de co-combustion avec une matrice Si-Al peuvent être utilisées dans les matériaux de constructions
- L'utilisation d'une installation industrielle de mélange  garantit la qualité et la performance des matériaux formulés
- L'approche ACV de chacun des mélanges permet la mise sur le marché de matériaux à très faible impact Carbone.

# Perspectives

- Développement de formules ultra bas carbone dans le domaine des matériaux de construction (géopolymères, matériaux alcali-activés, matériaux biosourcés...)
- Développement de nouvelles voies de valorisation pour les cendres issues d'autres technologies fonctionnant à la biomasse pure.



*SURSCHISTE*

***Merci pour votre attention,***

N'hésitez pas à nous contacter

**Fabrice Fayola**

C.E.O.

[fabrice.fayola@surschiste.com](mailto:fabrice.fayola@surschiste.com)

**Loïc Danest**

TECHNICAL DIRECTOR – R&D

[loic.danest@surschiste.com](mailto:loic.danest@surschiste.com)

