

Réactivité des cendres volcaniques équatoriennes dans les liants minéraux

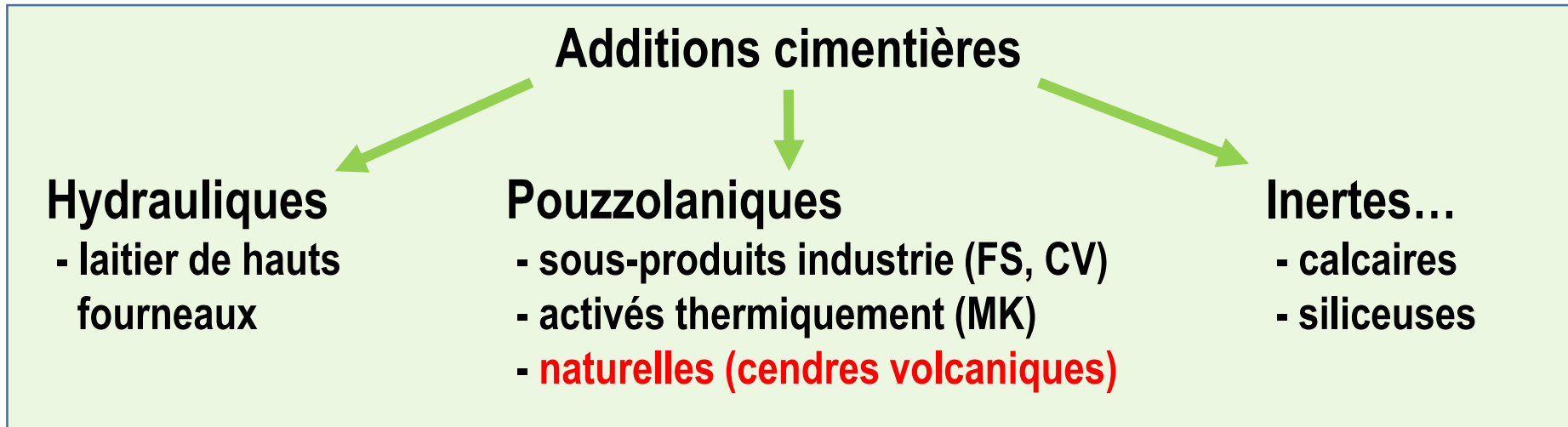
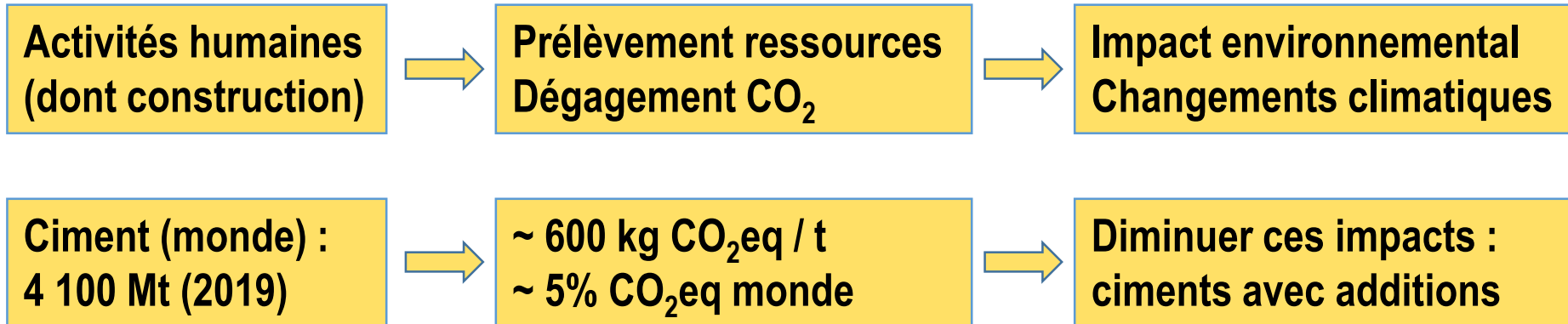
**Villacis Troncoso Eugenia¹, Kouta Nathalie²,
Escadeillas Gilles², Guerrero Barragan Victor Hugo³**

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, Laboratory of Material Testing and Soil Mechanics, Ladrón de Guevara E11-253, Escuela Politécnica Nacional, Quito 170525, Ecuador

² LMDC, UPS, INSA, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, 135, avenue de Rangueil, F-31 077 Toulouse Cedex 04, France

³ Department of Materials, Ladrón de Guevara E11-253, Escuela Politécnica Nacional, Quito 170525, Ecuador

Contexte



Cendres volcaniques

• Avantages

- Existent dans de nombreux pays
- Sont en quantité quasi illimitées
- Peu d'impact environnemental (transport + broyage)
- Pouzzolaniques...

• Inconvénients

- Peu d'études récentes
- Réactivités très variables

• Cas de l'Equateur

- 98 volcans (dont 31 actifs), plusieurs proches des grandes villes
- Un des 10 plus importants gisements de cendres volcaniques au monde



Cendres volcaniques

• Objectifs

- Valoriser au mieux les cendres volcaniques équatoriennes (bétons, traitements de sols)
 - Caractériser la réactivité des cendres
 - Optimiser leur dosage dans les liants/produits
 - Etudier les principales propriétés d'usage

• Moyens

- Caractériser la réactivité des cendres volcaniques
 - Essais chimiques : essai Chapelle, analyse thermique sur pâtes et mortiers
 - Essais calorimétriques : chaleur d'hydratation
 - Essais mécaniques : résistance en compression sur mortiers de ciment ou de chaux
- Optimisation des dosages dans les liants/produits et étude des principales propriétés
 - Essais sur béton
 - Essais sur sols traités

Matériaux

• Cendres volcaniques

• Nomenclature

Lieu prélèvement	N°	Lieu prélèvement	N°	Lieu prélèvement	N°
Chalupas	1	Chasqui	2	Cotopaxi Cima	3
Guagua Pichincha A	4	Guagua Pichincha B	5	Pululahua	6
Romerillos	7	San Felipe	8		

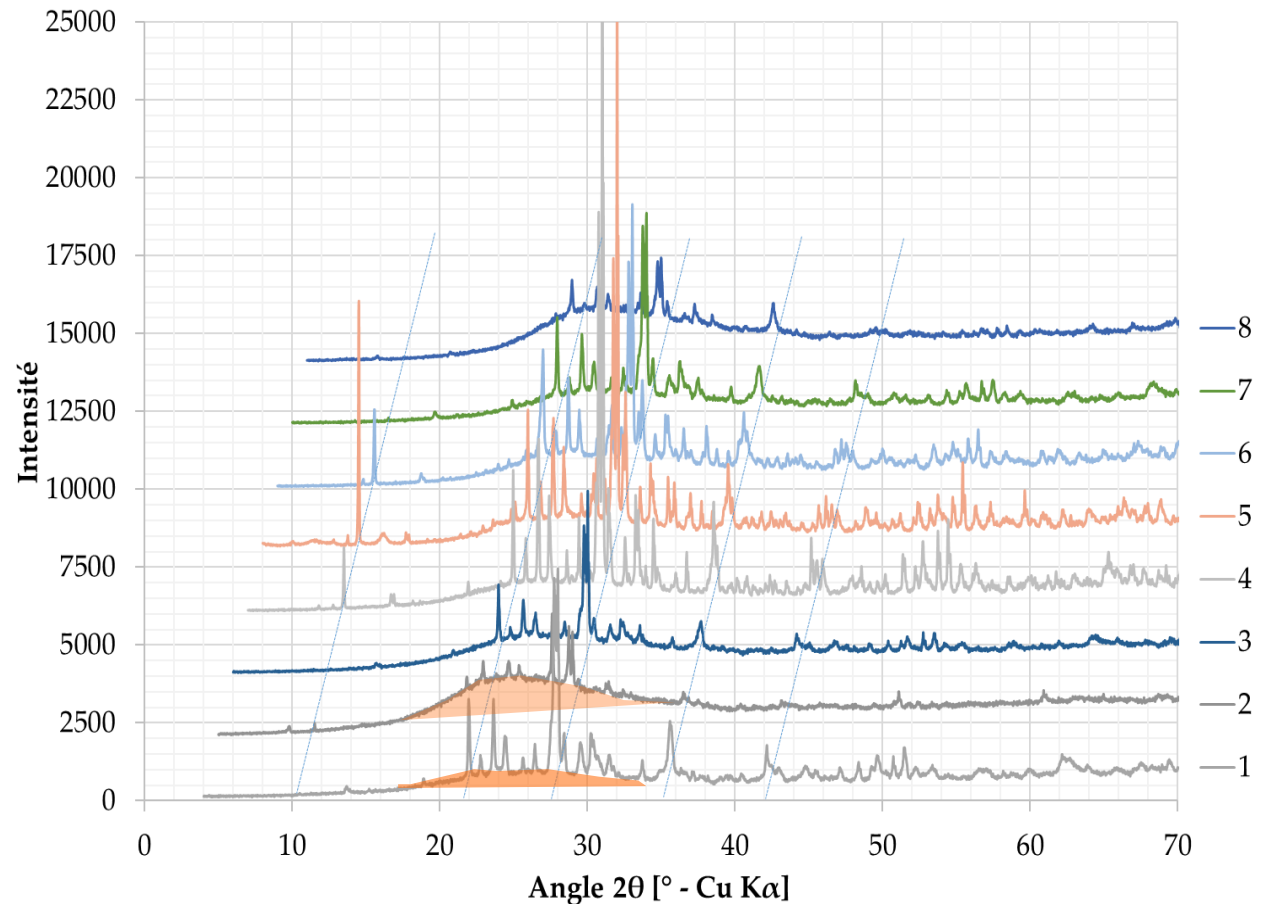
• Composition chimique (ICP, en %)

CV	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO
1	57,4	18,0	8,16	6,75	3,94	1,37	3,06
2	72,2	13,4	1,52	1,51	4,10	2,78	0,34
3	61,1	17,8	5,85	5,48	4,45	1,97	1,81
4	58,0	20,0	5,16	7,28	4,40	1,18	2,36
5	60,8	16,9	5,68	5,02	3,83	1,77	2,64
6	62,3	16,2	5,72	5,43	4,31	1,14	2,80
7	59,7	17,3	6,17	5,75	4,10	1,75	2,14
8	70,1	14,1	2,15	1,85	3,94	3,98	0,70
Moy.	62,68	16,72	5,05	4,88	4,13	1,99	1,98
E.T.	5,48	2,12	2,18	2,11	0,23	0,96	0,99

Matériaux

• Cendres volcaniques

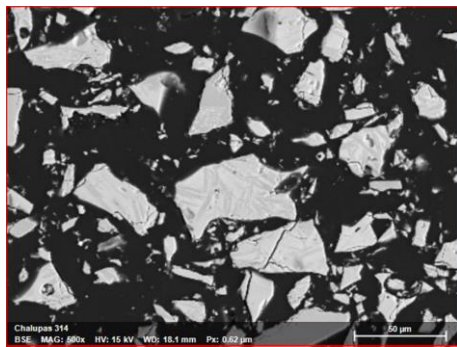
- Analyse minéralogique
 - Phase amorphe (surtout 2 et 8)
 - Phases cristallisées avec feldspaths (albite, anorthite, orthose) et hornblende
- Similitudes :
 - 1, 3 et 7
 - 2 et 8
 - 4, 5 et 6



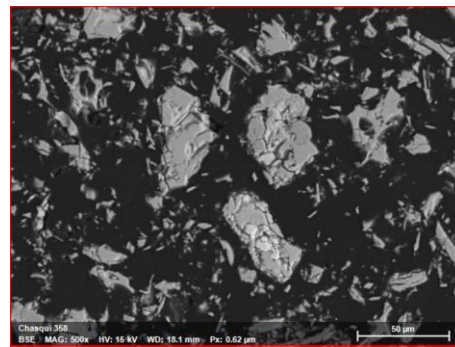
Matériaux

• Cendres volcaniques

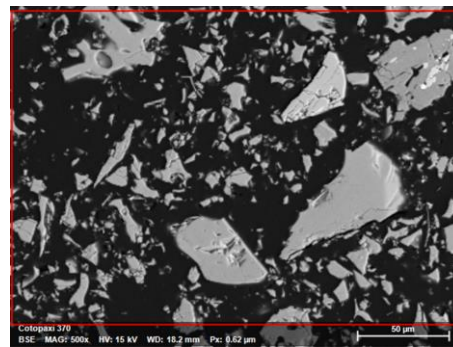
- Observation MEB lames minces polies (BSE, x 500)



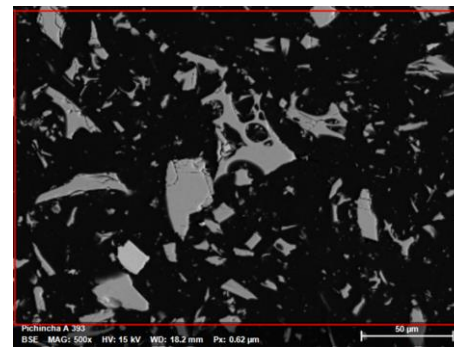
1



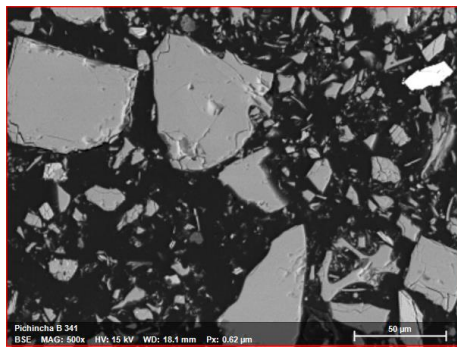
2



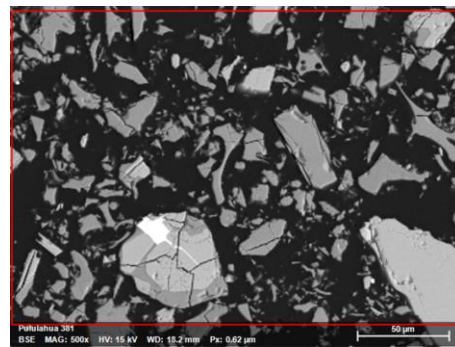
3



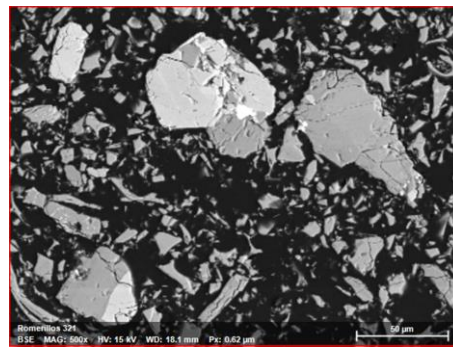
4



5



6



7



8

Matériaux

• Cendres volcaniques

- Autres caractéristiques
 - Granulométries proches (après broyage)
 - Faibles variations des masses volumiques

CV	Dv ₁₀ (μm)	Dv ₅₀ (μm)	Dv ₉₀ (μm)	Masse volumique (g/cm ³)
1	3,18	22,14	52,05	2,64
2	2,75	14,00	45,21	2,38
3	2,50	13,02	39,99	2,53
4	3,69	20,93	61,87	2,70
5	3,58	24,29	63,05	2,65
6	3,15	19,13	58,09	2,53
7	2,63	14,45	43,00	2,54
8	3,61	18,81	56,88	2,50
Moy.	3,14	18,88	52,43	2,58
E.T.	0,46	4,52	9,04	0,11

• Autres

- Ciment CEM I 52,5R (Le Teil)
- Chaux éteinte (Ca(OH)₂), sulfate de potassium (K₂SO₄), hydroxyde de potassium (KOH) et calcite (CaCO₃), de qualité analytique
- Sable normalisé Leucate (mortiers de ciment ou de chaux)
- Sable siliceux de granulométrie équivalente aux cendres (témoin inerte)

Essais

• Réactivité chimique

- Essai Chapelle modifié (NF P18-513)
 - Quantité de chaux éteinte fixée par 1 g de CV

- Procédure R3 sur pâte (Avet *et al.*, 2022)

- Réactivité dans un système similaire à celui des ciments (valeurs en g)

CH	CV	Eau	KOH*	K ₂ SO ₄ *	CaCO ₃
33,33	11,11	60	0,24	1,2	5,56

* KOH et K₂SO₄ mélangés à l'eau avant essai

- Suivi en microcalorimétrie sur 7 jours à 40 °C (appareil Tam Air) – Détermination de la chaleur cumulée à 3 et 7 jours
- Détermination eau liée à 7 jours – Séchage 24 h à 40 °C suivi d'un passage au four 2 h à 350 °C (la majorité des hydrates perdent leur eau de constitution entre 40 et 350 °C)

Essais

• Résistances mécaniques

- Essai LR modifié (d'après le TC 267-TRM de la RILEM)
 - Mortier à la chaux (valeurs en g)

CH	CV	Eau	KOH*	K ₂ SO ₄ *	CaCO ₃	Sable
210	210	300	1,2	6	30	1350

* KOH et K₂SO₄ mélangés à l'eau avant essai

- Fabrication d'éprouvettes 4x4x16 (cm) selon la norme EN 196-1:2016
- Traitement thermique à 50 ± 2 °C (2 jours en endogène dans les moules puis 3 et 8 jours en endogène dans des sacs étanches)
- Résistance mécanique en compression selon la norme EN 196-1:2016
- + Détermination eau liée sur morceaux de mortier (séchage 24 h à 40 °C suivi d'un passage au four 2 h à 350 °C) – Non prévue dans l'essai LR modifié
- Essai sur mortier de ciment à 20% de substitution de CV
 - Essais selon la norme EN 196-1:2016 (Rc à 7, 28 et 91 jours)

Réactivité chimique

• Essai Chapelle

CV	1	2	3	4	5	6	7	8
Ca(OH) ₂ fixé (mg/g)	1040	1330	1338	793	827	1313	1160	1142

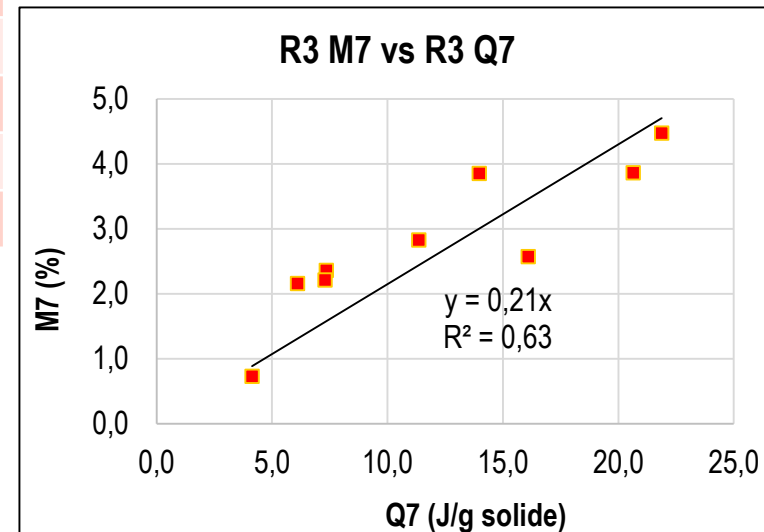
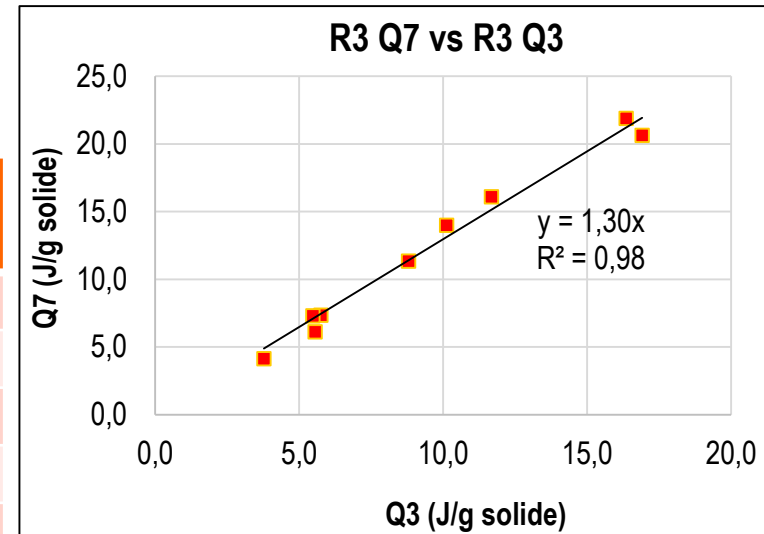
- CV réactives avec des différences notables
 - Faible réactivité pour les CV 4 et 5
 - Réactivité moyenne pour les CV 1, 7 et 8
 - Réactivité élevée pour les CV 2, 3 et 6

Réactivité chimique

• Essai R3 (40 °C)

CV	R3 Q3 (J/g solide)	R3 Q7 (J/g solide)	R3 M7 (%)
1	5,75	7,35	2,36 ± 0,37
2	16,35	21,88	4,47 ± 0,11
3	16,91	20,64	3,86 ± 0,21
4	8,80	11,35	2,83 ± 0,20
5	5,55	6,11	2,16 ± 0,04
6	5,47	7,30	2,21 ± 0,18
7	11,68	16,09	2,57 ± 0,06
8	10,12	13,98	3,85 ± 0,35
Quartz	3,77	4,13	0,73 ± 0,34

- Différences notables selon les CV
- Bonne corrélation entre R3 Q7 et R3 Q3
- Corrélation moyenne entre R3 M7 et R3 Q7

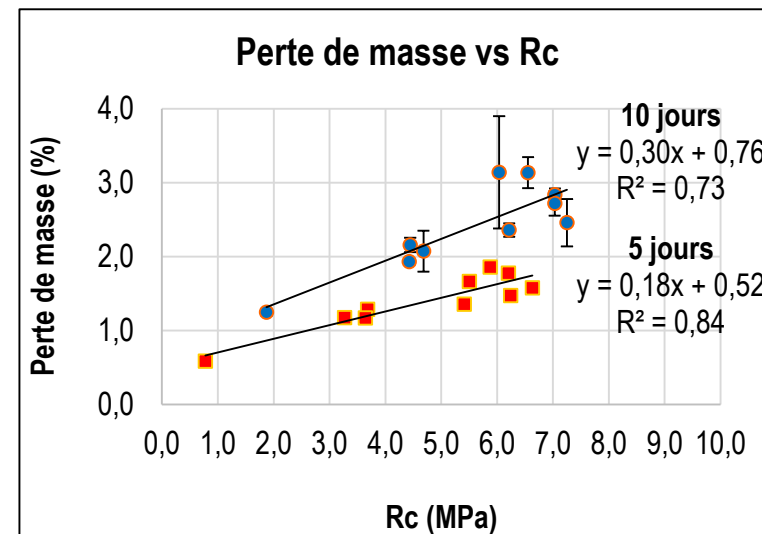
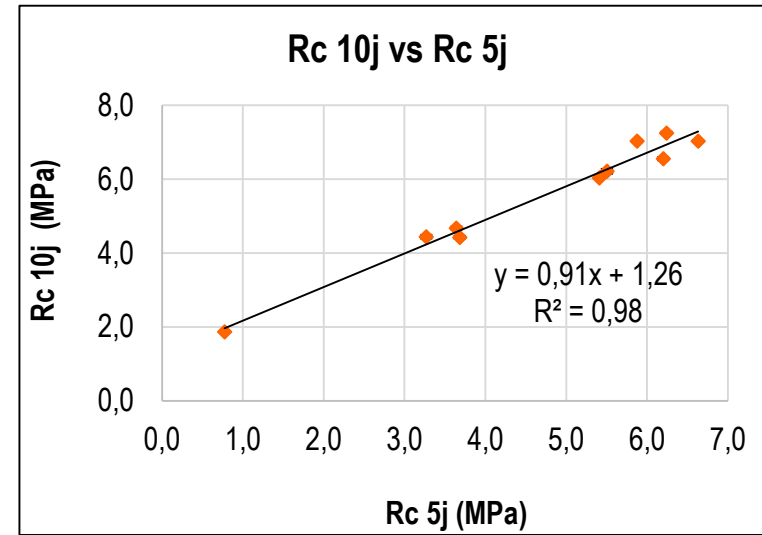


Résistance mécanique

• Essai LR modifié (50 °C)

CV	LR R5 (MPa)	LR R10 (MPa)	LR M5 (%)	LR M10 (%)
1	3,27 ± 0,24	4,44 ± 0,07	1,17 ± 0,05	2,16 ± 0,10
2	6,20 ± 0,11	6,55 ± 0,20	1,77 ± 0,04	3,13 ± 0,21
3	6,63 ± 0,03	7,04 ± 0,10	1,58 ± 0,02	2,83 ± 0,09
4	5,41 ± 0,12	6,04 ± 0,16	1,35 ± 0,01	3,14 ± 0,76
5	3,68 ± 0,01	4,43 ± 0,12	1,28 ± 0,04	1,93 ± 0,04
6	3,64 ± 0,12	4,68 ± 0,06	1,17 ± 0,04	2,07 ± 0,28
7	6,24 ± 0,11	7,25 ± 0,10	1,47 ± 0,03	2,46 ± 0,32
8	5,50 ± 0,12	6,22 ± 0,16	1,66 ± 0,07	2,36 ± 0,09
Quartz	0,78 ± 0,04	1,87 ± 0,05	0,58 ± 0,01	1,24 ± 0,04

- Différences notables selon les CV
- Bonne corrélation entre Rc 10j et Rc 5j
- Corrélation moyenne entre ΔM et Résist.



Résistance mécanique

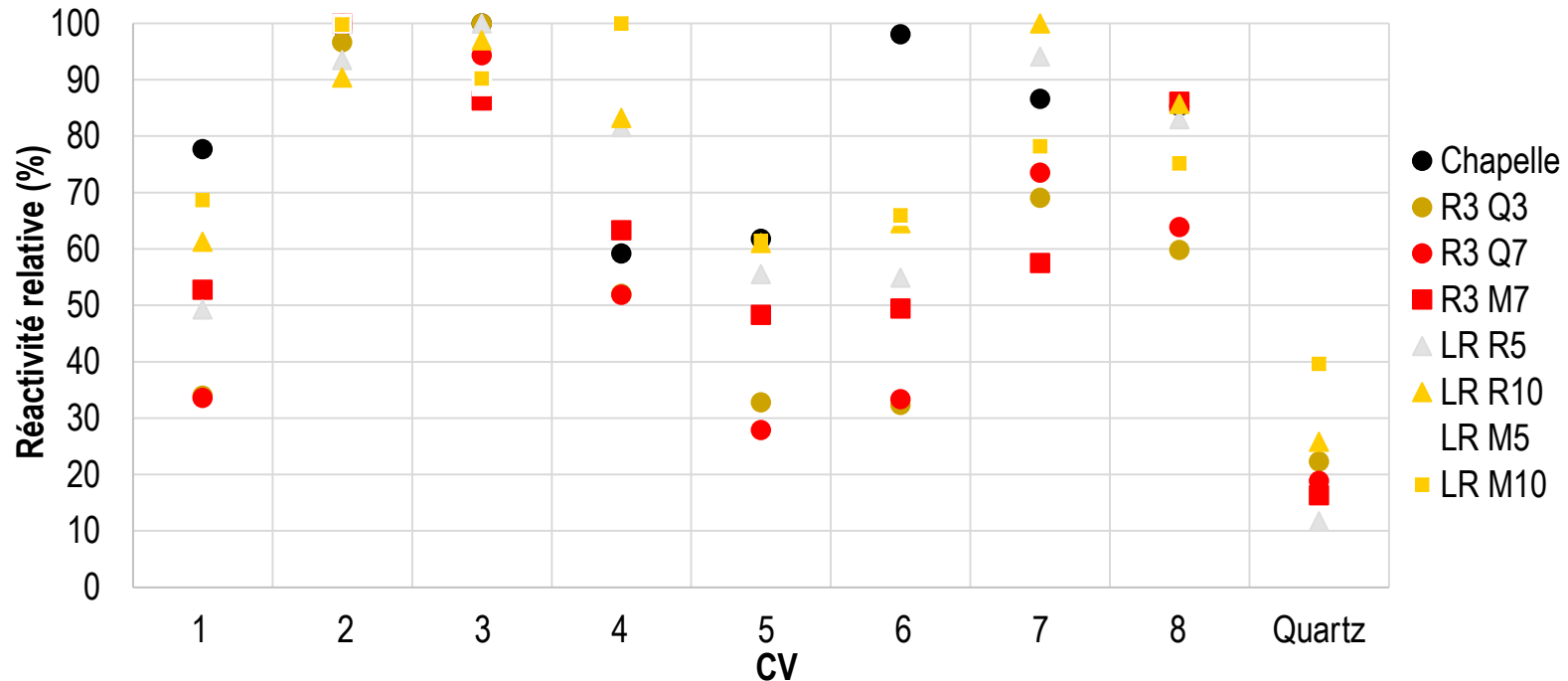
• Essai mortier EN 196.1 (20% CV)

CV	Rc 7 jours (MPa)	Rc 28 jours (MPa)	Rc 91 jours (MPa)
1	40,04 ± 0,18	52,31 ± 0,62	53,38 ± 0,89
2	40,83 ± 1,00	56,02 ± 0,38	58,98 ± 0,46
3	42,71 ± 0,11	54,02 ± 0,41	55,81 ± 0,33
4	42,27 ± 0,13	55,02 ± 0,21	57,42 ± 0,72
5	44,33 ± 0,08	49,35 ± 0,34	57,69 ± 0,77
6	43,46 ± 0,18	52,90 ± 1,15	54,35 ± 0,40
7	37,94 ± 0,05	50,15 ± 0,47	58,63 ± 0,23
8	42,90 ± 0,11	56,15 ± 0,26	56,69 ± 0,28
Témoin	53,17 ± 0,03	64,69 ± 0,20	66,15 ± 0,33

- Faibles différences selon les CV (max 5 MPa)
- Evolution des résistances relatives par rapport au témoin
 - 78,6 ± 3,7% à 7 jours ; 82,3 ± 3,7% à 28 jours ; 85,6 ± 2,8% à 91 jours

Bilan

• Réactivité relative selon essai



- Réactivité des CV démontrée par rapport au quartz « inerte » (mais inégale)
- Quelques résultats bien groupés (CV 2 et 3)... d'autres plus dispersés !
 - **Difficulté à trouver un essai pertinent...**

Conclusions

- **Sur la réactivité des cendres volcaniques**
 - Réactivité démontrée (grandes différences selon les cendres... et les essais !)
- **Sur les essais de réactivité**
 - Essai Chapelle : pas de corrélation systématique avec les autres essais
 - Essais R3 : problème de sensibilité / microcalorimétrie mais intérêt certain de la perte de masse au four à 350 °C (facilité, rapidité, reproductibilité)
 - Essais LR modifié : permettent de bien différencier les CV
 - Essais mortiers selon EN 196-1 : tendance à « écraser » les différences de réactivité

Perspectives

- Relation entre composition chimique des CV et réactivité (analyse de la partie amorphe) et étude de la finesse
- Vérification des classements de réactivité sur matériau d'usage (béton, sols)

MERCI
POUR VOTRE ATTENTION

DES QUESTIONS ?

**Réactivité des cendres volcaniques
équatoriennes dans les liants minéraux**

**Villacis Troncoso E., Kouta N.,
Escadeillas G., Guerrero Barragan V. H.**