

5^{ème} Ecole d'automne du GDR MBS

Eco-conception des matériaux biosourcés et géosourcés : de la ressource à la fin de vie

12 au 16 octobre 2025, Douai



Du mortier romain à la conception de bétons végétaux : compréhension des mécanismes de durcissement

Morgan CHABANNES

Enseignant-Chercheur – IMT Nord Europe

morgan.chabannes@imt-nord-europe.fr



Laboratoire
de Génie Civil
et géo-Environnement



IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité



GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



Sommaire

- ❖ Pourquoi s'intéresser au mortier romain pour les bétons bio-sourcés ?
- ❖ Les différents types de chaux et mécanismes de durcissement associés
- ❖ De la définition du terme « pouzzolane » - Focus sur les matériaux pyroclastiques du Velay
- ❖ Le système pouzzolane—chaux—eau : caractérisation de la cinétique de durcissement et enjeux scientifiques avec les granulats biosourcés

Contexte environnemental

Chaux (Différents types de chaux existent)

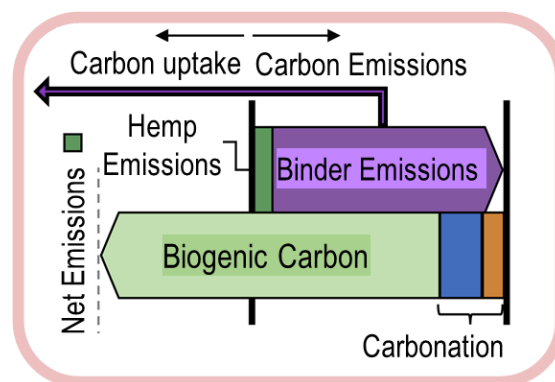


Granulat végétal

- Chènevotte de chanvre
- Anas de lin (contexte régional)
- Balles de riz
- Etc.

Ciment → Souvent présent dans les liants commerciaux

Chaux formulée FL (NF EN 459-1) : chaux calcique CL (hydratée) combinée avec d'autres liants i.e. NHL, CEM I ou composé, additions pouzzolaniques, filler calcaire, laitier granulé de haut fourneau



[7] J. H. Arehart et al., 2020

Exemple : FL A $40 \leq \%_m \text{Ca(OH)}_2 < 80$

PRG **A1–A3** (kgCO₂-eq/kg) :

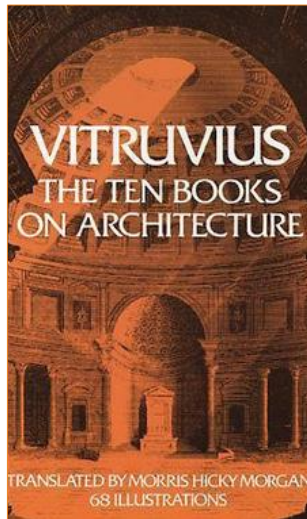
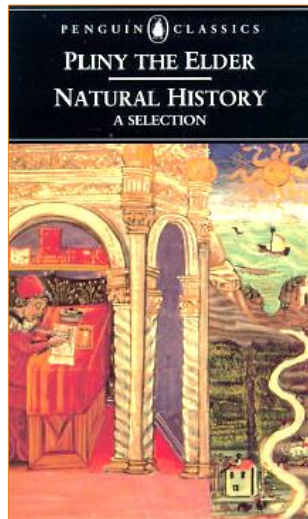


CL90-S/Q, CEM I	0,8 – 1,2	[1-3]
NHL3.5/5	0,7 – 0,8	[3,4]
Métakaolin	0,28	[5]
Ponce broyée	0,04	[6]



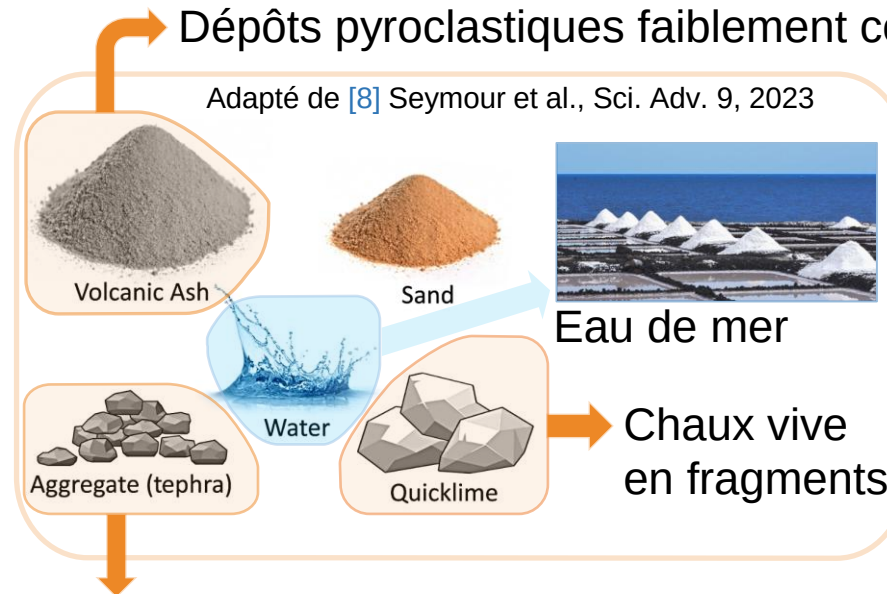
[1] PAO George et al., J. Clean. Prod., 18, 1171-1176, 2010
 [2] Adbri Lime Products EPD (Australia)
 [3] J. Diaz-Basteris et al., Constr. Build. Mater., 326, 126863, 2022
 [4] Jones & Hammond, Inventory of Carbon & Energy V3.0 Beta
 [5] Cradle-to-gate Ecoprofile data sheet of Argical M1000 (Imerys, France)
 [6] Cabrera-Luna et al., Cement Concr. Compos., 124, 104236, 2021
 [7] J. H. Arehart et al., J. Clean. Prod., 266, 121846, 2020

Le « béton romain »



20 — 80 av. J.-C.

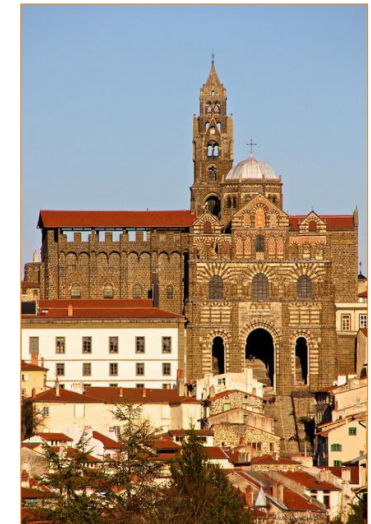
- Souvent de nature basaltique dans la région du Massif Central
- Vitruve (Pozzuoli, Italie) → cinérites trachytiques altérées en tuf zéolitique dénommé « tuf jaune napolitain »



Tuf volcanique qui a pu être exploité historiquement pour la pierre de construction (pierre de pouzzolane)

➔ « Pouzzolanes »

➔ Matériaux divers et complexes (faciès minéralogique, géochimie, texture pétrographique)



Cathédrale romane du Puy-en-Velay — 43 (UNESCO)

Le « béton romain »

- Ratio massique chaux/pouzzolane = 1/2 à 1/4 (soit 20 à 33% de chaux)

[9] Jackson et al., American Mineralogist 98, 2013

- L'addition de petites quantités de matériaux pouzzolaniques aux chaux et ciments n'est pas toujours très rationnelle
- Des proportions importantes permettent d'exploiter au mieux les propriétés et avantages de la pouzzolane

- Points faisant l'objet de controverses et de différences d'interprétation des traités antiques d'architecture (comme *De Architectura*, Vitruve, I^{er} siècle av. J.-C.) :

- Le gâchage dans l'eau de mer

[10] L. Vicat, Nouvelles études sur les pouzzolanes artificielles comparées à la pouzzolane d'Italie dans leur emploi en eau douce et en eau de mer, 1846

- Le process d'hydratation de la chaux vive

Wet lime putty VS. **Hot mixed
Dry slaking**



méthode traditionnelle : la chaux vive s'hydrate directement mélangée avec le sable et la pouzzolane sans excès d'eau



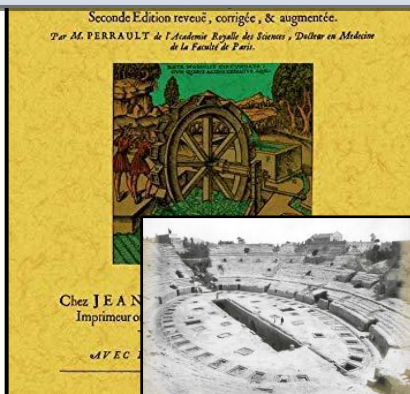
Stephen Pickering, 2016 (18th century)
Repaired with hot mixed air lime mortars

Bétons biosourcés et bâti ancien

20–30 av. J.-C



Période Gréco-Romaine [...]



Néolithique

~ 7000 av. J.-C.



Çatal Höyük
(Anatolie centrale)



« Bâti ancien »

- Hérité du Moyen Âge
- Terre cuite
 - Pierre naturelle
 - Torchis, Pisé
 - Murs à pans de bois
 - Chaux

- Parois perspirantes
- Forte inertie thermique
- « Paroi froide »

1948



Reconstruction

- Préfabrication lourde
- Corps en béton de pouzzolane (caverneux)

RT 1974



- Confort d'été (surchauffe)
- Impact CO₂ des matériaux

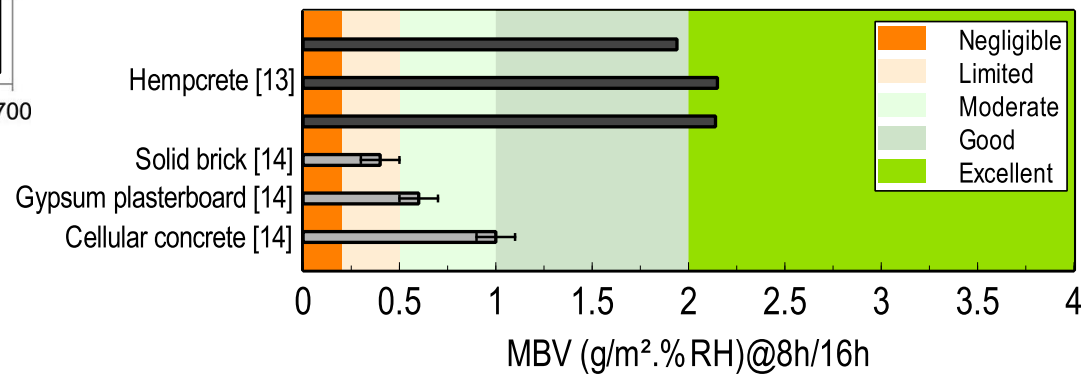
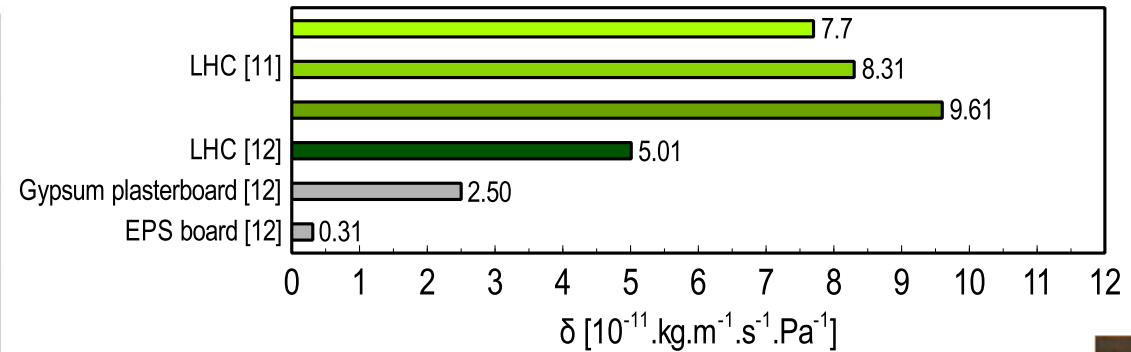
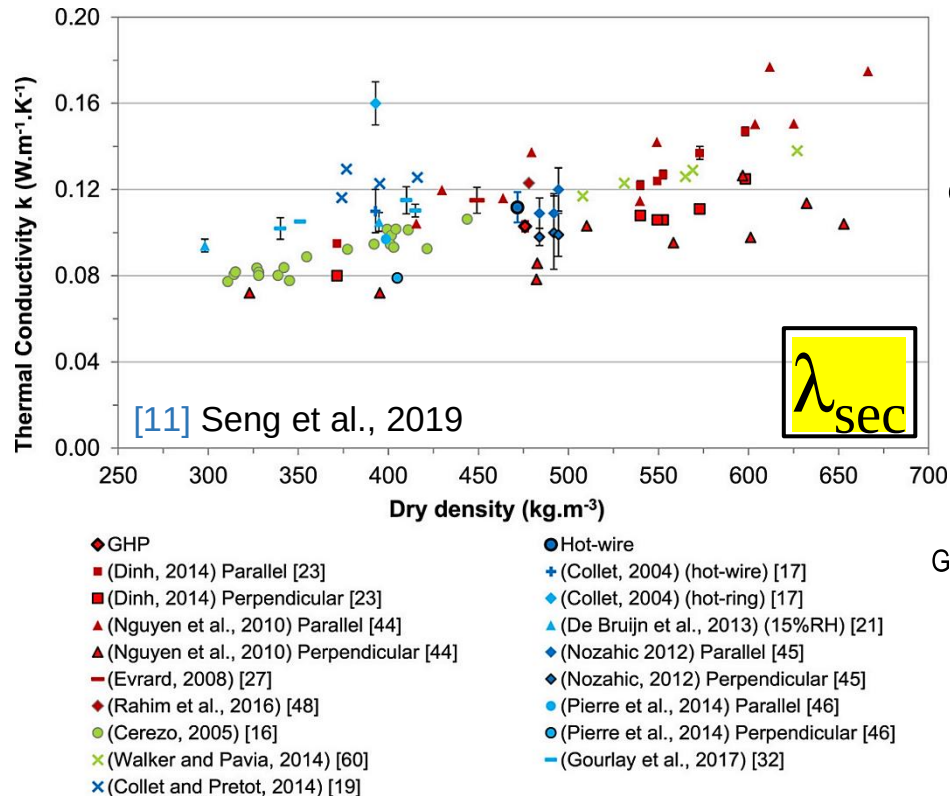


RE 2020



- Bétons végétaux (bétons de chanvre)
- Terre, chaux ou plâtre avec liège, pouzzolane, argile expansée

Bétons biosourcés et bâti ancien



Graham Durrant
Wall of a historic home in UK

- [11] Seng et al., Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties. Journal of Building Engineering 24, 2019, 100540
- [12] Pietrak et al., Magnesium-hemp concrete is less vapor-permeable than lime-hemp concrete while the cup method is still problematic. Building and Environment 280, 2025, 113112
- [13] Collet et al., Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. Energy and buildings 62, 2013, 294-303
- [14] Rode et al., Moisture Buffering of building materials. Technical University of Denmark, BYG Report No. R-127, 2005

Bétons biosourcés et bâti ancien

➤ Réhabilitation thermique

$\lambda \approx 0,10 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ $\Rightarrow R = 3 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$
e = 30 cm
« moyen »

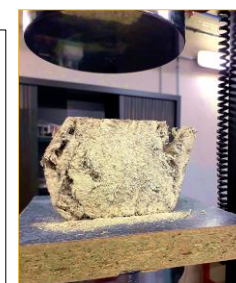
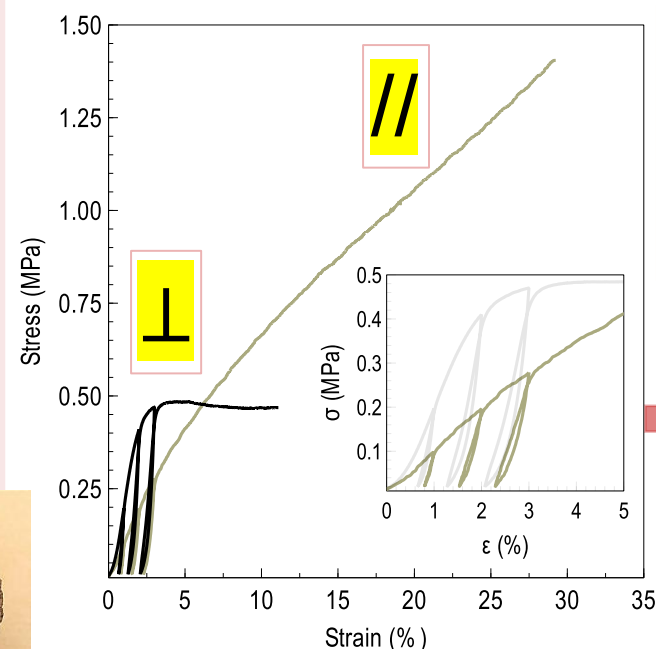
- En neuf : $R \geq 5 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$
- Plus adapté à l'existant

- Conservation de l'inertie thermique (densité)
- Effusivité thermique (effet « paroi tiède »)
- Préservation de l'expression architecturale (correction thermique intérieure)
- Perspiration (tampon hydrique)



Cliché Alain Robert

➤ Comportement mécanique



Performances mécaniques applicatives aléatoires

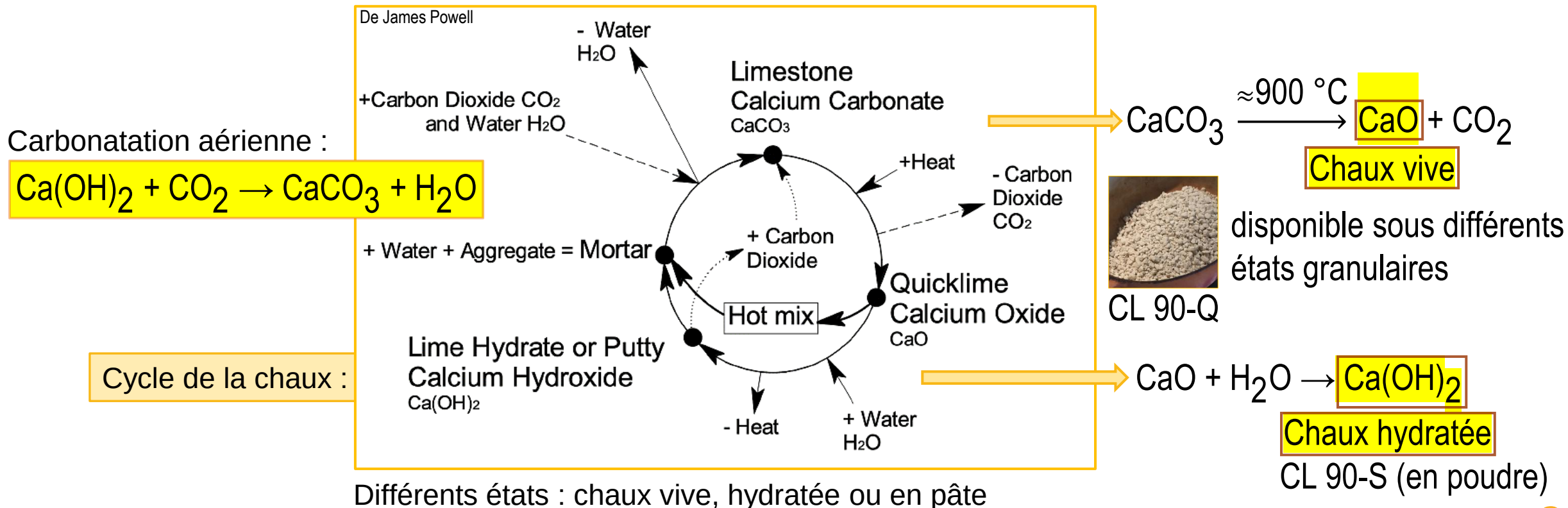
- Compacité
- Conditions de cure
- Couple liant-végétal
- Fraction minérale

Les chaux de construction

☐ Chaux aériennes

⇒ Chaux calciques (CL 90 : $\text{CaO} + \text{MgO} \geq 90 \%_m$)

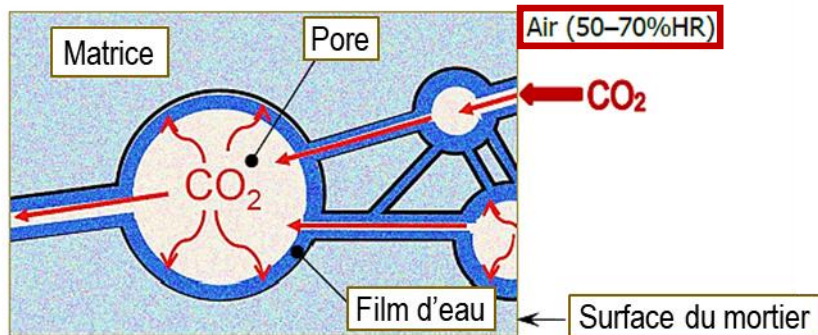
⇒ Chaux dolomitiques (DL 90-30 : $\text{CaO} + \text{MgO} \geq 90 \%_m$ et $\text{MgO} \geq 30 \%_m$)



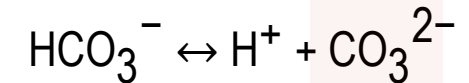
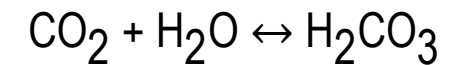
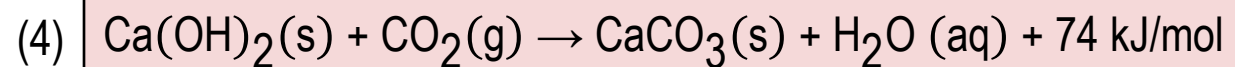
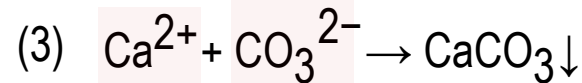
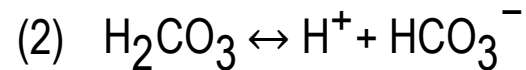
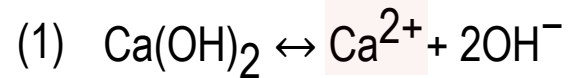
Les chaux de construction

➤ Durcissement par séchage et carbonatation

• Mécanisme réactionnel



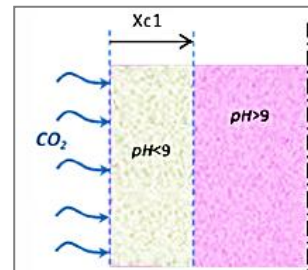
[15] Cizer et al., 2012



• Caractérisation de la cinétique de carbonatation

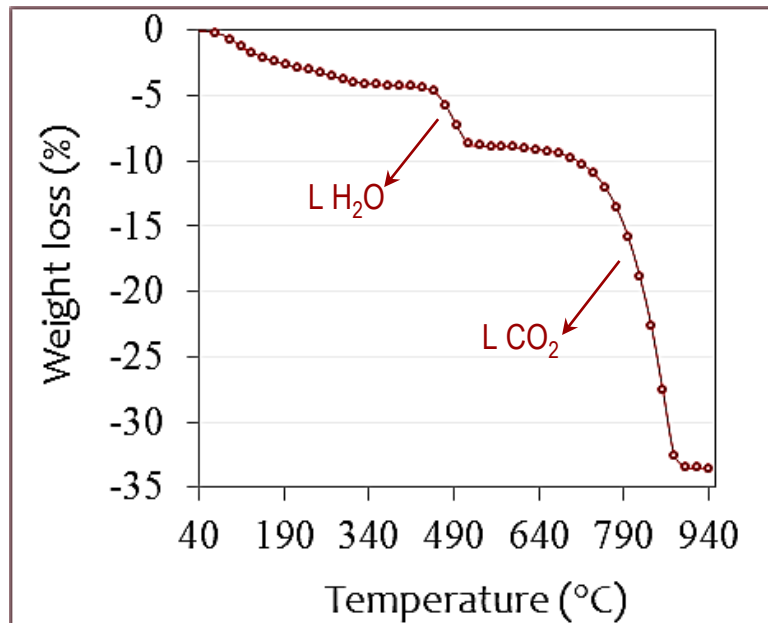
- Indicateur coloré (phénolphtaléine) : obtenir des indications sur la progression du front de carbonatation

- Suivi massique :
$$\text{CR} (\%) = \frac{\Delta M / \text{Ca(OH)}_2 (\%)}{35.1} \times 100$$



Les chaux de construction

- Thermogravimétrie (ATG)



$$Ca(OH)_2 (\%) = L H_2O (\%) \times k_1$$

$$CaCO_3 (\%) = L CO_2 (\%) \times k_2$$

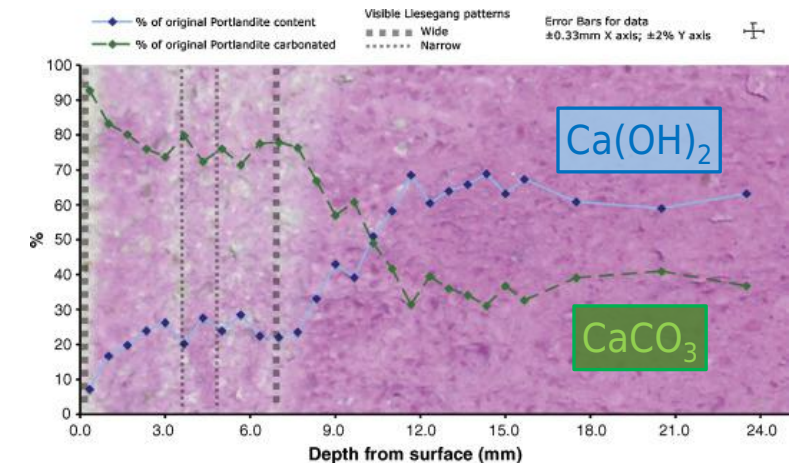
$$k_1 = M_W [Ca(OH)_2] / M_W [H_2O]$$

$$k_2 = M_W [CaCO_3] / M_W [CO_2]$$

% $Ca(OH)_2$
mesuré à un instant
« t » par ATG

$$CR (\%) = \frac{\% CH_i - \% CH_t}{\% CH_i} \times 100$$

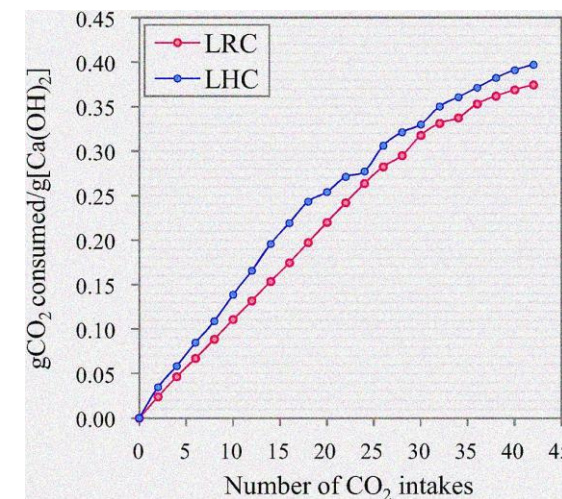
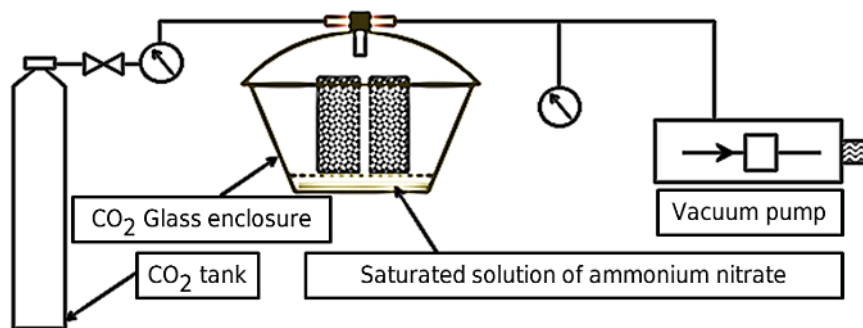
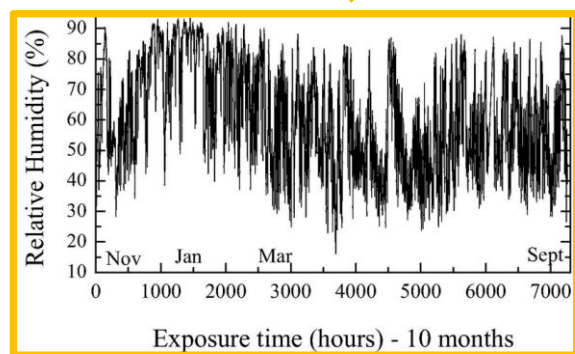
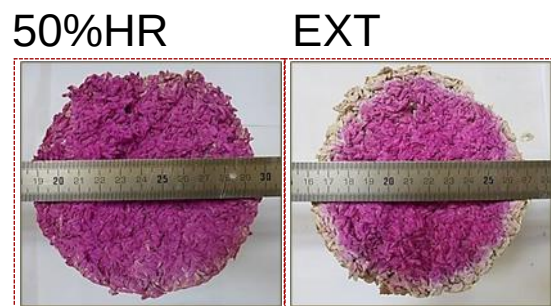
Quantité initiale de $Ca(OH)_2$



[16] Lawrence et al., 2006

Les chaux de construction

- Cas de la carbonatation accélérée cyclique

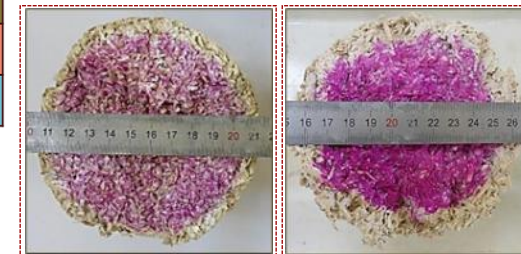


[17] Chabannes et al., 2015



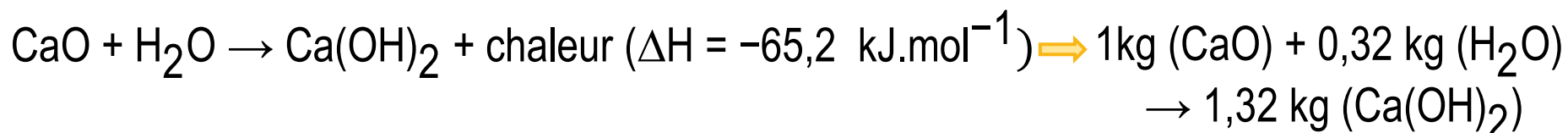
CR (%)	CO ₂	WG	TGA
LRC	62.9	72.1	80.4
LHC	66.7	71.5	67.3

Acc



Les chaux de construction

- Quelques éléments à propos de l'hydratation de la chaux vive

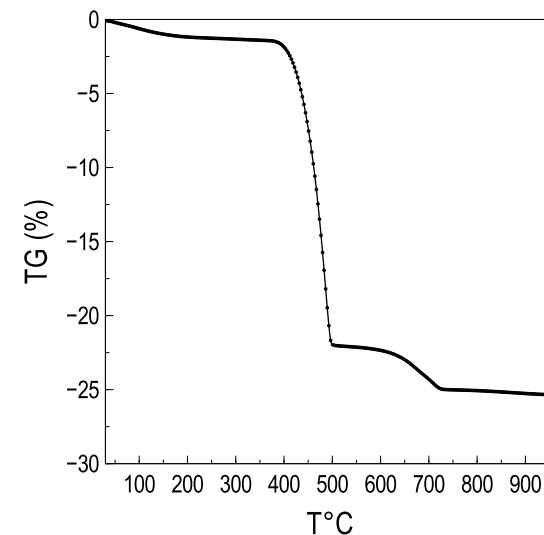
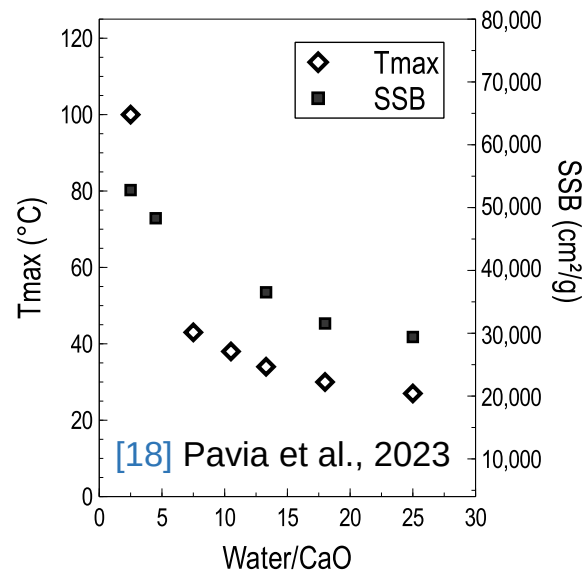
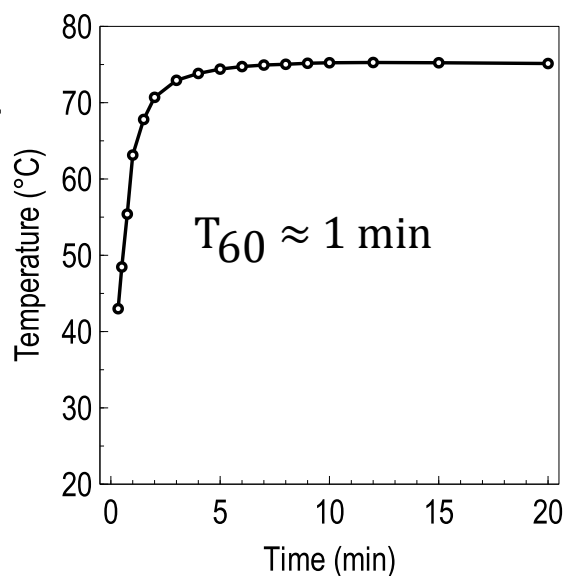


	g.cm ⁻³
CaO	≈ 3,3
Ca(OH) ₂	≈ 2,2

v×2

Essai de réactivité :
(NF EN 459-2)

$$\text{H}_2\text{O/CL 90-Q} = 4$$



$$\text{CaO (\%)} = \text{residue} - (\text{CC} \Rightarrow \text{CaO}) - (\text{CH} \Rightarrow \text{CaO})$$

Les chaux de construction

☐ Chaux ayant des propriétés hydrauliques

⇒ Chaux formulées (FL)

⇒ Chaux hydraulique naturelle (NHL)

19^{ème} siècle : émulation pour remplacer les mélanges chaux–pouzzolane de l'époque Romaine

Redécouverte de l'hydraulicité dans un contexte de renouveau scientifique et technique

1817-18 : Vicat définit l'indice d'hydraulicité et publie ses travaux sur les propriétés hydrauliques de la chaux

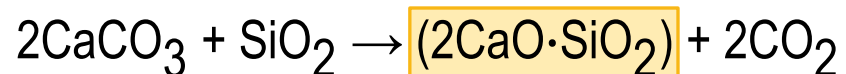
→ Ouvre la voie au ciment Portland

NHL produite par calcination de calcaires plus ou moins argileux/siliceux

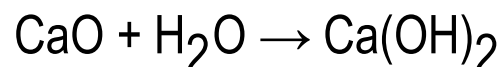
$$\text{Indice d'hydraulicité : } i = \frac{m(\text{SiO}_2) + m(\text{Al}_2\text{O}_3) + m(\text{Fe}_2\text{O}_3)}{m(\text{CaO}) + m(\text{MgO})} \cong \frac{m(\text{SiO}_2)}{m(\text{CaO})}$$

Les chaux de construction

Une partie du CaO se combine avec la silice réactive à $\approx 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$:



C₂S : silicate bicalcique



Chimique		Minéralogique	
% CaO	50 — 70	% Ca(OH) ₂	30 — 50
% SiO ₂	6 — 20	% C ₂ S	20 — 40
LOI (%)	15 — 20	% CaCO ₃	5 — 20

Oxydes d'aluminium et de fer en très petites proportions $\rightarrow \text{C}_3\text{A}, \text{C}_4\text{AF}$

	% Ca(OH) ₂	R _{C – 28jours} min (MPa)
CL 90	≥ 80	s/o
NHL 2	≥ 35	≥ 2
NHL 3,5	≥ 25	≥ 3,5
NHL 5	≥ 15	≥ 5

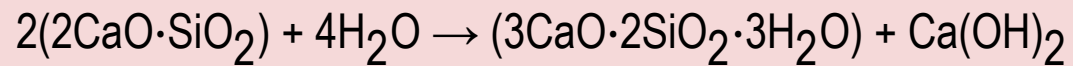
65 % HR $\Rightarrow$ Carbonatation aérienne

> 90 % HR $\Rightarrow$ Prise hydraulique (hydratation du C₂S)

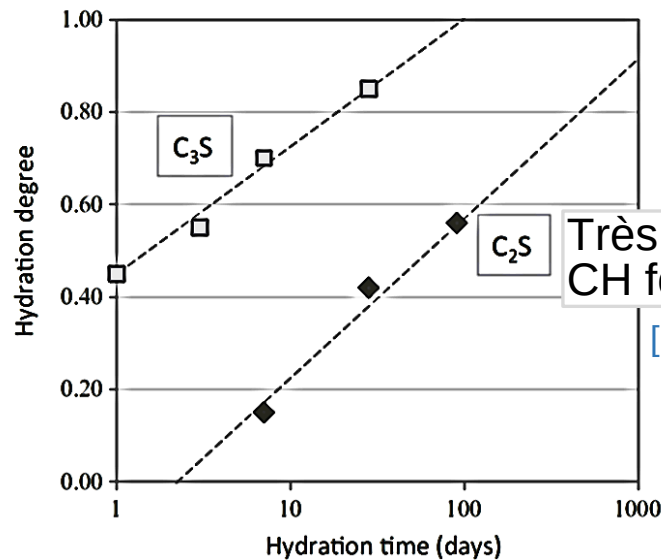
Les chaux de construction

➤ Durcissement par hydratation et carbonatation

- Réaction d'hydratation du C_2S :



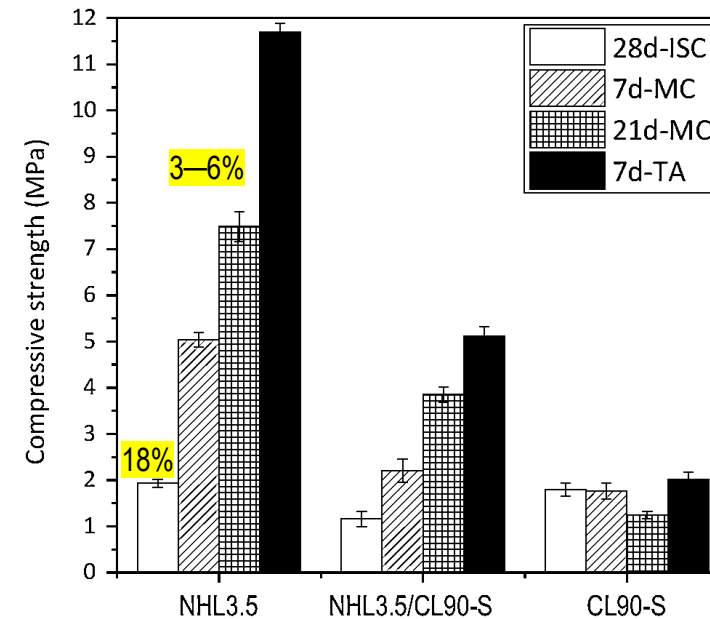
→ C—S—H



Très faible quantité de CH formée

[19] Goñi et al., 2010

R-compression mortiers de chaux après 28 jours de cure :



[20] Chabannes et al., 2016

$$CR (\%) = \frac{\% \text{ (Newly formed CC) } \times k_3}{\% CH_i} \times 100$$

$$k_3 = M_w [Ca(OH)_2] / M_w [CaCO_3]$$

[19] Goñi et al., Quantitative study of hydration of C_2S and C_3S by thermal analysis. J. Therm. Anal. Calorim 102(3), 965-973, 2010

[20] Chabannes et al., Effect of curing conditions and $Ca(OH)_2$ -treated aggregates on mechanical properties of rice husk and hemp concretes using a lime-based binder. Constr. Build. Mater. 102(1),821-833, 2016

La « pouzzolane »

❑ Définition

- Historique : cendres trachytiques altérées en tufs zéolitiques (« Pouzzoles »)
 - Géologique : par extension dans le langage courant, l'ensemble des projections volcaniques — dépôts pyroclastiques ou pyroclastites — analogues à celles de Pouzzoles mais pouvant présenter différentes lithologies et généralement de faible granulométrie
- ⇒ Dépôts pyroclastiques faiblement consolidés : bombes (>64mm), lapilli (2—64mm), scories fines/cendres (<2mm)
- ⇒ Induration dans le temps (gravité, cimentation par précipitation de minéraux secondaires, altération hydrothermale)
- Tufs lithifiés
 - Brèches agglomérées
 - Conglomérats de lapilli
 - Cinérites



⇒ Dépôts pyroclastiques consolidés (tufs)

Crédit photo : Yvan Lemeur
Marais de Limagne (Devès)

La « pouzzolane »

➡ Phénomènes post-éruptifs précoces liés à des altérations ou soudures rapides

- Ex : Ancienne carrière du Mont Denise (Devès) :

Partie centrale = Cône de scories autour du cratère
→ édifice volcanique strombolien avec faciès cœur de cône (rouge) et bas de cône (noir)

Les scories peuvent recouvrir des coulées de lave basaltique solidifiée (éruption effusive)



Tuf à palagonite = altération du verre volcanique basaltique (interaction eau-magma)

➡ Volcanisme de type Surtseyens (explosif)

- Les ignimbrites : formées par induration thermique/soudure à chaud (fusion partielle des fragments) → présentes principalement au niveau du Mont-Dore, quasi-absentes dans la plupart des autres provinces volcaniques du Massif Central



Nappe de ponce
Photo R. Cadiou

La « pouzzolane »

- L'ensemble de ces formations pyroclastiques constitue les **pouzzolanes naturelles**
 - ➡ Entité géologique

- « Matériau pouzzolanique » (ASTM C125-07 ou C618) : englobe les pouzzolanes dites artificielles

Tout matériau siliceux ou silico-alumineux, naturel ou artificiel, qui ne possède pas lui-même de propriétés hydrauliques, mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'eau, est capable de fixer la chaux à température ordinaire pour former des hydrates générateurs de résistance

[21] Baudry & Camus, 1980

- ➡ Entité physico-chimique

❑ Les pouzzolanes naturelles

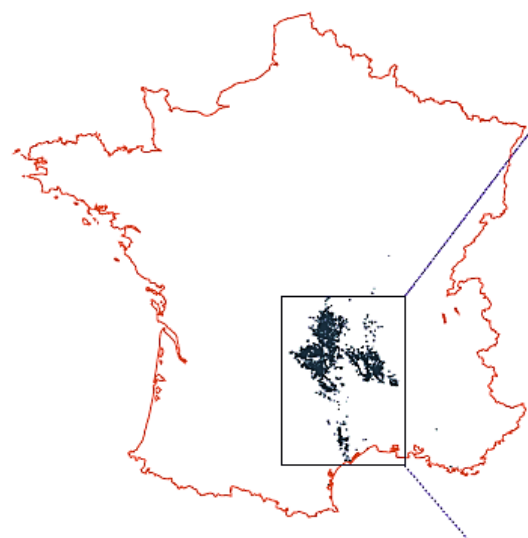


Empire Romain (sous Auguste)

[21] Baudry & Camus. Les projections volcaniques de la chaîne des Puys et leur utilisation, BRGM, 1980.

La « pouzzolane »

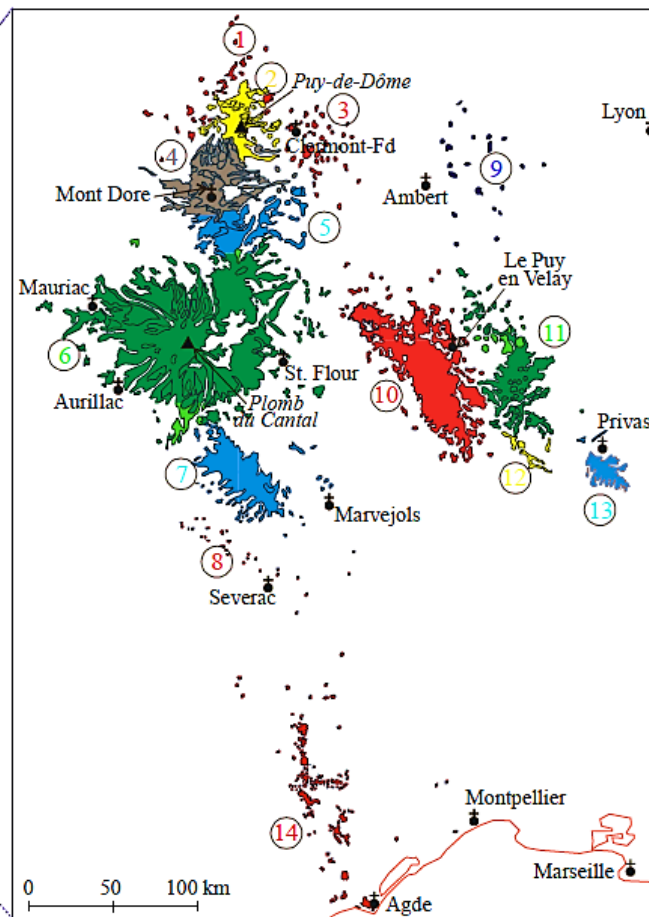
➤ Provinces volcaniques du Massif Central



Principales provinces et ages du volcanisme alcalin du Massif Central Français (Ma: millions d'années)

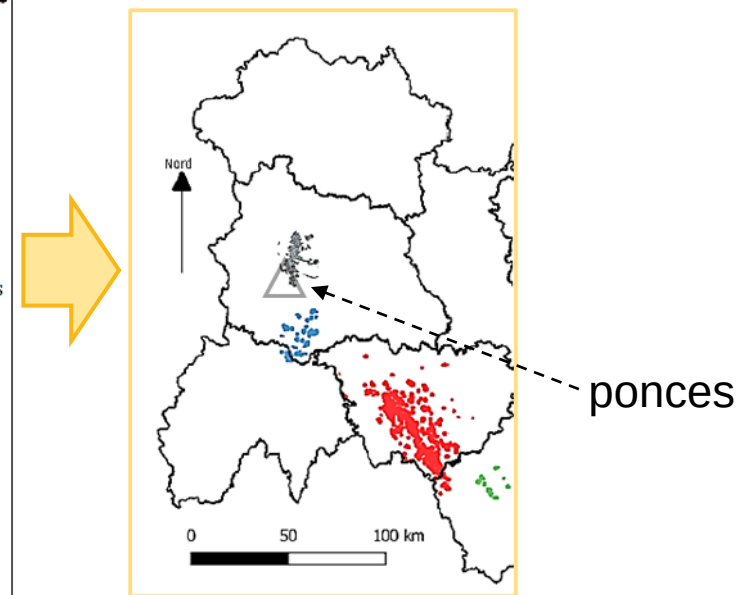
- | | |
|--|---|
| 1 - Chaîne de la Sioule (5 à 1 Ma) | 8 - Causses (14 à 2 Ma) |
| 2 - Chaîne des Puys (150 000 à 3500 ans) | 9 - Forez (15 à 13 Ma) |
| 3 - Limagne (15 à 2 Ma) | 10 - Deves (2,7 à 0,6 Ma) |
| 4 - Mont Dore (2,5 à 0,2 Ma) | 11 - Velay (14 à 1 Ma) |
| 5 - Cézallier (8 à 3 Ma) | 12 - Vivarais (35 000 à 10 000 ans) |
| 6 - Cantal (11 à 3 Ma) | 13 - Coirons (8 à 5,5 Ma) |
| 7 - Aubrac (9 à 6 Ma) | 14 - Escandorgue-Languedoc (3,5 à 0,8 Ma) |

[22] Nehlig et al., 2010



D'après Nehlig P. Et Traineau H. (1998)

Gisements de pouzzolane (●●●●●) :

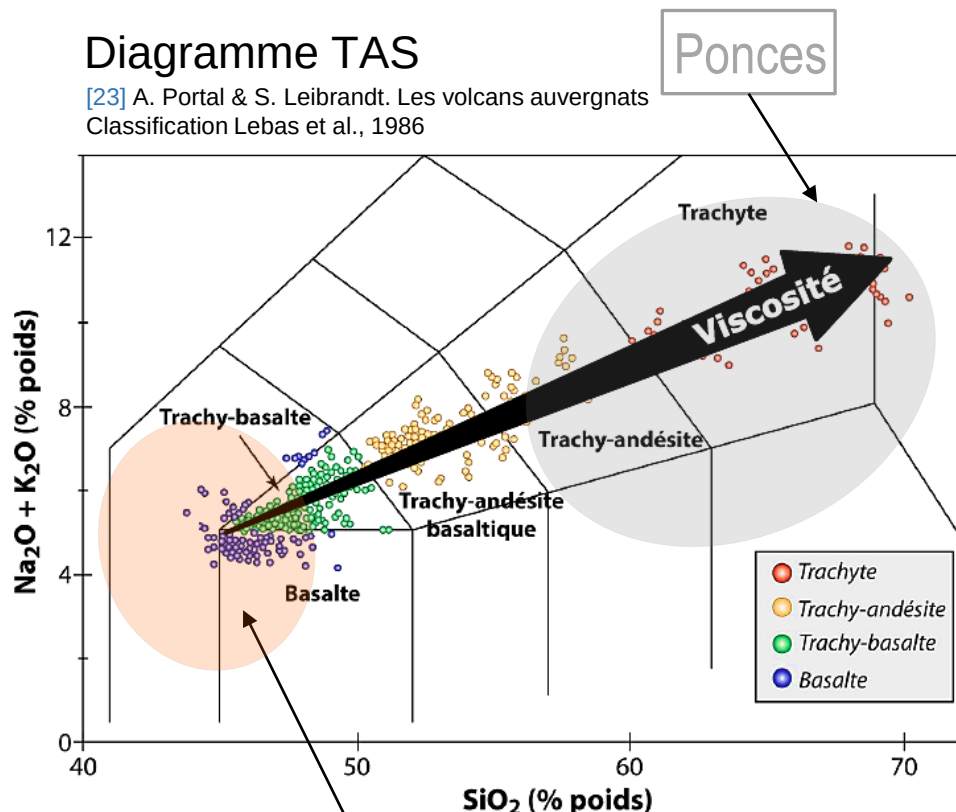


BRGM

La « pouzzolane »

Diagramme TAS

[23] A. Portal & S. Leibrandt. Les volcans auvergnats
Classification Lebas et al., 1986



Pyroclastites basaltiques = Pouzzolanes

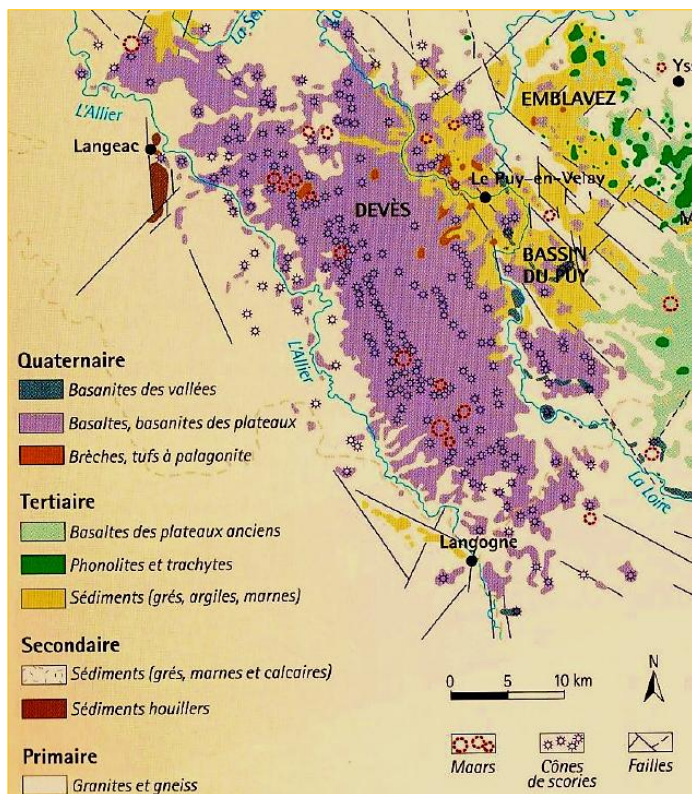
Référentiel français (BRGM)

- Ponces
 - Éruptions volcaniques explosives
 - Friables et de teinte claire
 - Grande viscosité du magma : texture fortement vésiculée et richesse en verre volcanique amorphe
 - Projections acides : 60 – 70 % de SiO_2 (trachyte – rhyolite – dacite)
- Pouzzolanes
 - Pyroclastites scoriacées, essentiellement stromboliennes
 - De couleur noire ou rouge selon le degré d'oxydation du fer
 - Projections basiques (45 – 52 % de SiO_2) voire ultra-basiques (< 45%)
 - Faible proportion en verre volcanique amorphe (par rapport aux ponces)

Par altération du verre : Zéolites (tufs) et/ou minéraux argileux

La « pouzzolane »

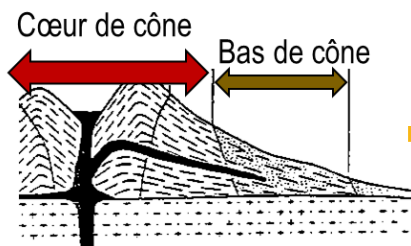
□ Focus sur les pyroclastites basaltiques du Devès



- 150 cônes de scories alignés (armés ou non par des basaltes compacts)
- Activité strombolienne et dans une moindre mesure phréato-magmatique (maars, anneaux de tufs surtseyens)
- Dynamisme faiblement explosif (cône de projections avec cratère sommital)
- Basaltes alcalins fluides sous-saturés en silice, expulsés en surface sous forme de coulées ou de projections (dégagements gazeux et épanchement de lave)

⇒ Coulées de lave associées à des formations pyroclastiques :
- plus ou moins soudées (pyroclastes peu consolidés, tuf)
- Tufs hyaloclastiques à palagonite ou brèches

⇒ Matériaux meubles vulnérables à l'altération météorique

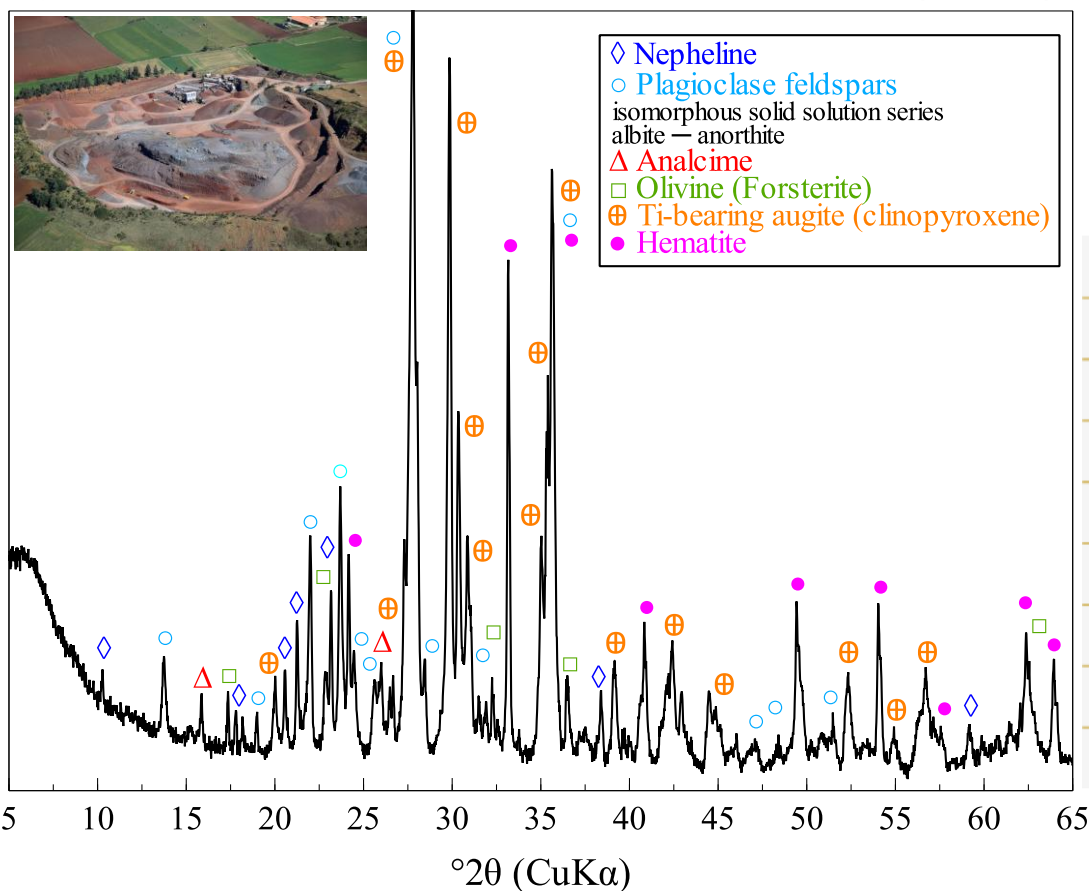


[24] Audubert et al., 2010

[24] F. Audubert et al. La commission de volcanisme dans le Devès. Saga Information N°317, 2012.

La « pouzzolane »

Pyroclastites basaltiques faiblement consolidées (Devès) :



- Forte teneur en cristallites (pouzzolanes = verre + cristaux)
- Jamais de quartz dans les basaltes alcalins (olivine, pyroxène)
- Feldspathoïdes (néphéline)
- Minéraux secondaires d'origine hydrothermale (analcime)

XRF (wt.%)

SiO ₂	44.8	LOI	3.4
Al ₂ O ₃	13.2		
Fe ₂ O ₃	11.5		
CaO	8.5		
MgO	9.3		
Na ₂ O	4.2		
K ₂ O	1.5		
TiO ₂	2.2		

La « pouzzolane »

1778

[25] B. Faujas de St Fond
Recherches sur les volcans
éteints du Vivarais et du
Velay, E.O., 1778

1950 — 1970

Exploitation anarchiste
peu réglementée



<https://www.ina.fr/ina-eclair-actu/video/caf93027251/les-volcans-d-auvergne>
19.03.1972

1977

Création du PNR
(Parc Naturel Régional
des Volcans d'Auvergne)



- Utilisation plus noble
- Valorisation à forte valeur ajoutée
- Structurer des filières stratégiques associées à une extraction respectueuse du patrimoine géologique

Le système pouzzolane—chaux—eau

□ La pouzzolanicité

Selon l'approche d'Hervé Pichon [26] :

Ensemble des phénomènes chimiques liés aux interactions entre les pouzzolanes et la chaux en solution et des phénomènes mécaniques induits

➡ $PZ = f(E_p, E_c, E_m)$

E_p : capacité du matériau à combiner la chaux du milieu (**espérance chimique**)

E_c : nature des phases minérales solides néoformées et microstructure associée (**expression chimique**)

E_m : **expression mécanique** (durcissement et résistance mécanique induite)

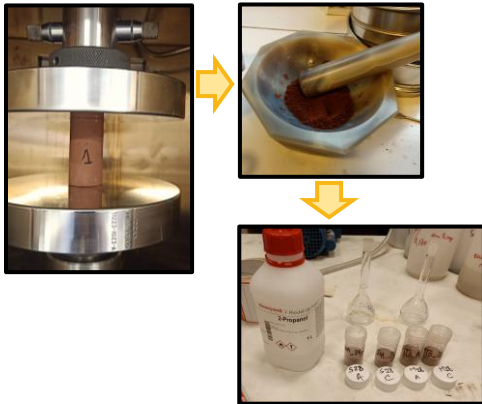
Facteurs d'influence :

- Finesse de la pouzzolane broyée (taille et surface spécifique)
- Nature lithologique (composition chimique et minéralogique)
- Teneur en chaux (et type)
- %HR de conservation et température de cure (forte énergie d'activation)
- Proportion d'eau résiduelle non consommée par les réactions

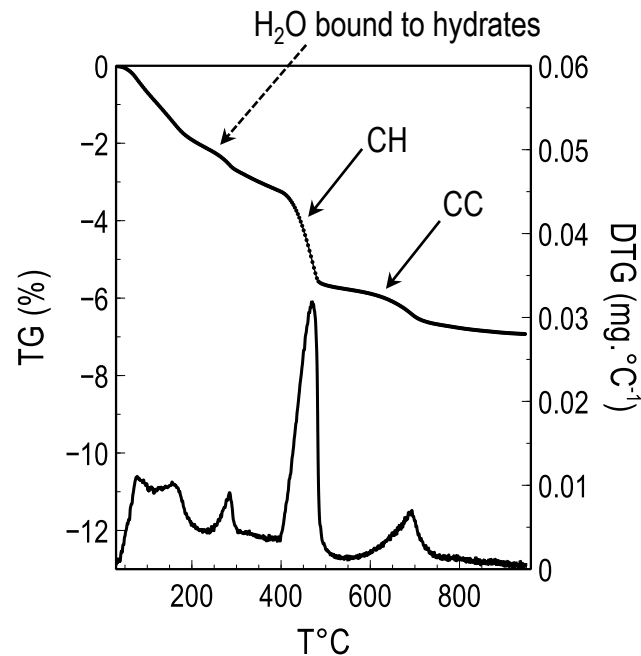
Le système pouzzolane—chaux—eau

❑ Chaux combinée

➤ Réaction pouzzolanique : $x\text{Ca(OH)}_2 + y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{SiO}_2 + (n-x)\text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CaO})_x \cdot (\text{SiO}_2)_z \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3)_y \cdot (\text{H}_2\text{O})_{n-x}$ (C–A–S–H)



Déshydratation/séchage
Isopropanol — vide

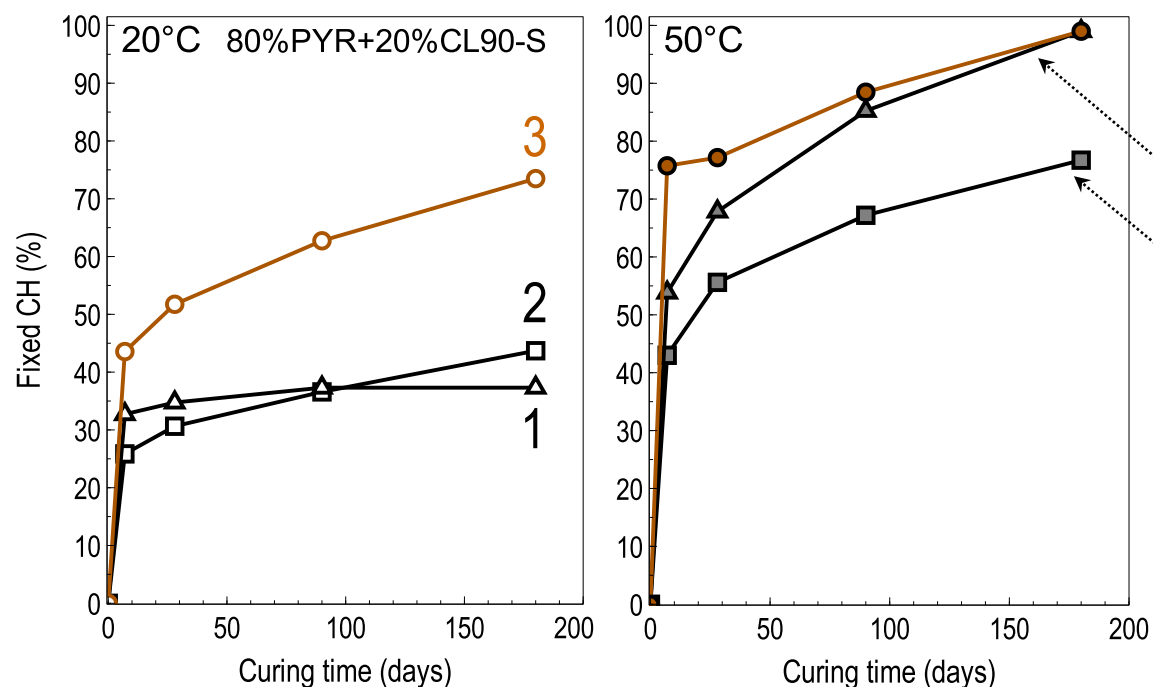


$$\text{Free Ca(OH)}_2 (\%) = \frac{\% \text{Ca(OH)}_2, \text{ measured}}{1 - (\text{H}_2\text{O}_{\text{bound}})}$$

$$\begin{aligned} \text{Combined Ca(OH)}_2 (\%) &= \\ &= \frac{\text{CH}_i (\%) - \text{Free Ca(OH)}_2 (\%) - \text{carbonated CH} (\%)}{\text{CH}_i (\%)} \times 100 \end{aligned}$$

Le système pouzzolane—chaux—eau

➤ Cinétique de consommation de la chaux :



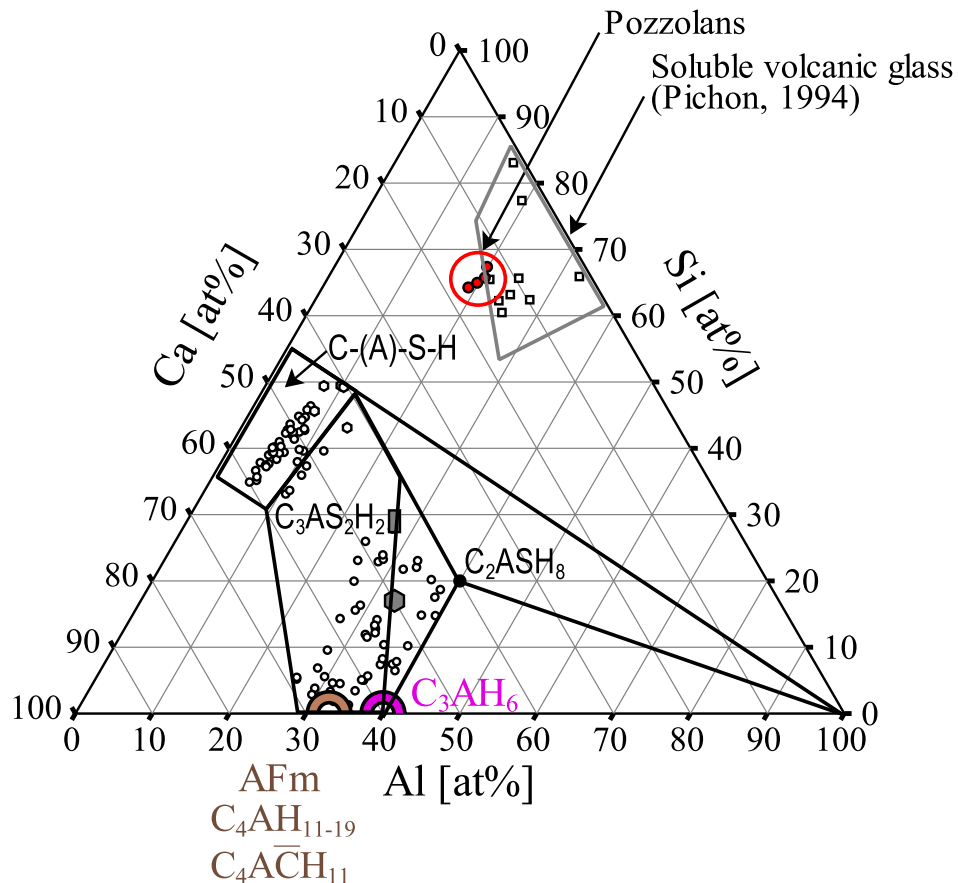
	SSA _{BET} (m ² .g ⁻¹)	W/P
1	9.67	0.49
2	1.07	0.38
3	6.06	0.46

Mineral Component	Lime Reaction (mg CaO/g)
<i>Rhenish trass</i>	
Quartz	43
Feldspar	117
Leucite	90
Analcime	190
Kaolin	34
Glass phase	364
Total	—
<i>Bavarian trass (glass phase only)</i>	272
<i>Obsidian glass</i>	176

[27] Ludwig & Schwiete, 1962

Le système pouzzolane—chaux—eau

☐ Phases minérales néoformées



Expression chimique ($\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$) :

- Phases AFm :

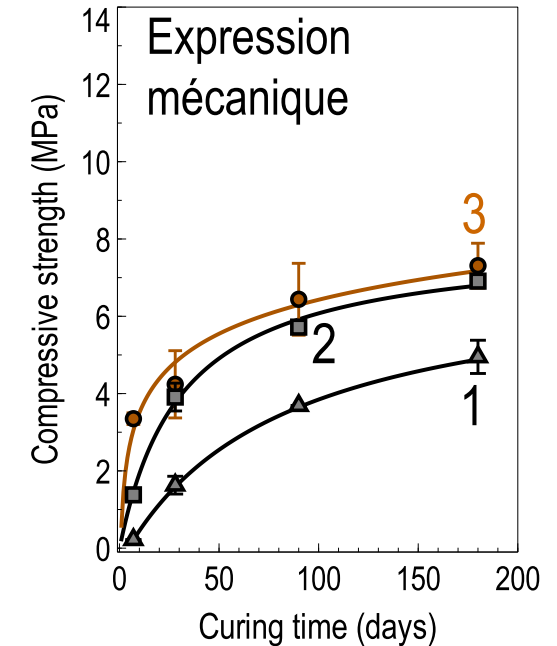
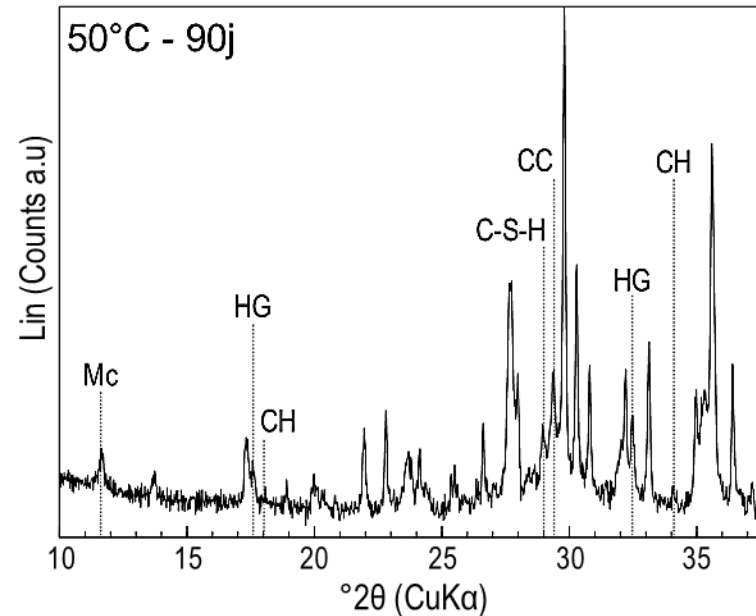
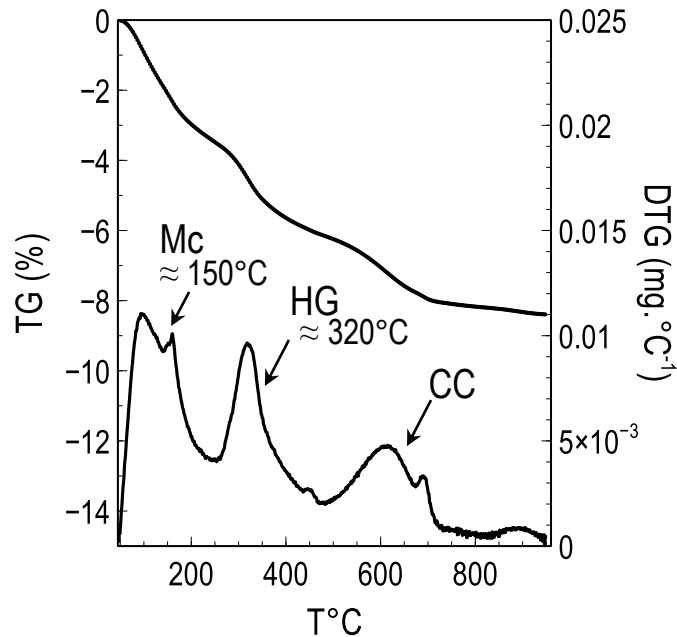
$\text{C}_4\text{AH}_{11-19}$ (C_4AH_{13} : OH-AFm peu stable)

En présence de CO_2 ou de carbonates $\Rightarrow \text{CO}_3\text{-AFm}$

Hemicarboaluminate ($\text{C}_4\text{A}\bar{\text{C}}_{0.5}\text{H}_{12}$) ou monocarboaluminate ($\text{C}_4\text{A}\bar{\text{C}}\text{H}_{11}$)

- Cas de la strätlingite (C_2ASH_8) : stable à faible Ca/Si (systèmes MK-CH)
 $\rightarrow$ environnement saturé en humidité pour précipiter et se maintenir
- Série de solutions solides des hydrogénats : $\text{C}_3\text{AS}_x\text{H}_{6-2x}$
katoïte — hibschite (C_3AH_6 — $\text{C}_3\text{AS}_2\text{H}_2$)
 $\rightarrow$ se forme à des âges avancés ou à température de cure élevée
- C-S-H plus ou moins enrichis en Al de substitution ($\text{Al}^{3+} \leftrightarrow \text{Si}^{4+}$)

Le système pouzzolane—chaux—eau



- Pyroclastites basiques hyposiliceuses : rôle important de l'alumine
- Réaction rapide de l'alumine avec la chaux ⇒ AFm HG ⇒ raidissement au jeune âge par remplissage et intercroissance
- Formation des C-(A)-S-H lente et progressive
- Les propriétés liantes peuvent rester faibles malgré de grandes quantités de chaux fixée (espérance chimique)

Le système pouzzolane—chaux—eau

- L'expression mécanique dépend du type de produits néoformés en liaison avec leur texture

PZ = f [chaux combinée → produits néoformés → contribution intrinsèque (matrice cohésive) + densification de la porosité → durcissement]

➡ 20°C VS. 50°C

Dans un système $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_4\text{-H}_2\text{O}$:

- Ettringite ($\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$) formée les 1^{ères} heures
 - $\text{SO}_4\text{-Afm} \rightarrow$ monosulfoaluminate (Ms) : $\text{C}_4\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{12}$
- Selon $\text{SO}_4^{2-}/\text{Al}_2\text{O}_3$ et température

$T^\circ\text{C} > 45^\circ\text{C} \Rightarrow$ Stabilité de Ms au détriment de l'ettringite
([28] Damidot & Glasser, 1992)

→ L'ajout de Na_2SO_4 est connu pour accélérer le durcissement des systèmes pouzzolane—chaux—eau

Enjeu granulats bio-sourcés : les conditions de cure

- $T^\circ\text{C}$ élevée au jeune âge (relargage de polysaccharides)
- Séchage → carbonatation de la chaux libre voire de certains produits néoformés (C-S-H, AFm, AFt)

Expérience :

- 80 % PYR non broyée (0–2mm)
- 20 % CL90-S
- Addition de Na_2SO_4

E/L : 0.25 — 0.36

Liant pur et avec granulats végétaux

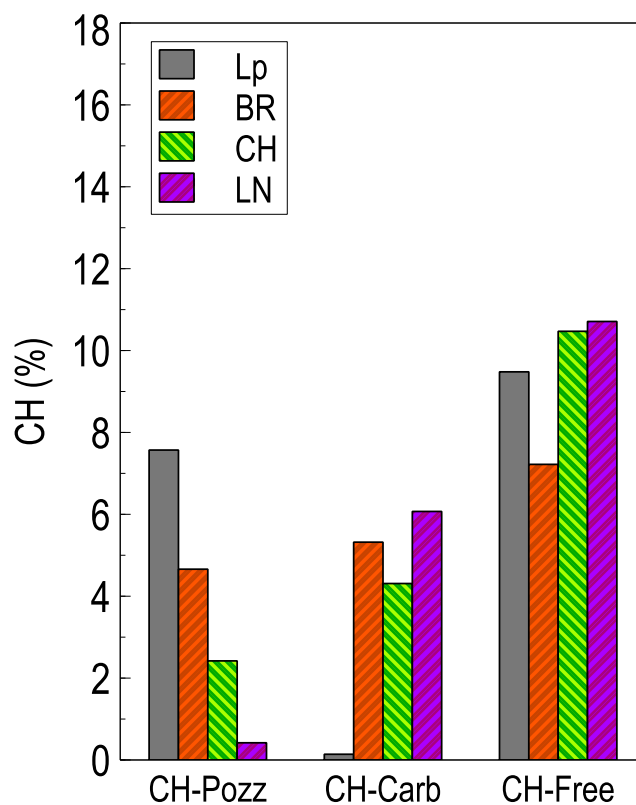
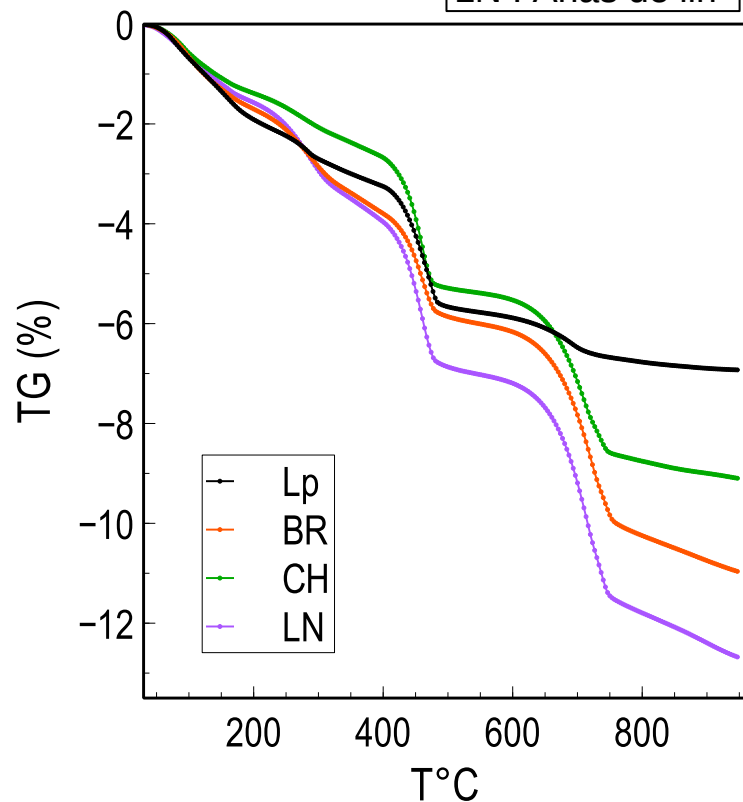
50°C
100%RH
7 days



Analyses

Granulats biosourcés et pouzzolanité

Lp : Liant pur
BR : Balle de riz
CH : Chènevotte
LN : Anas de lin



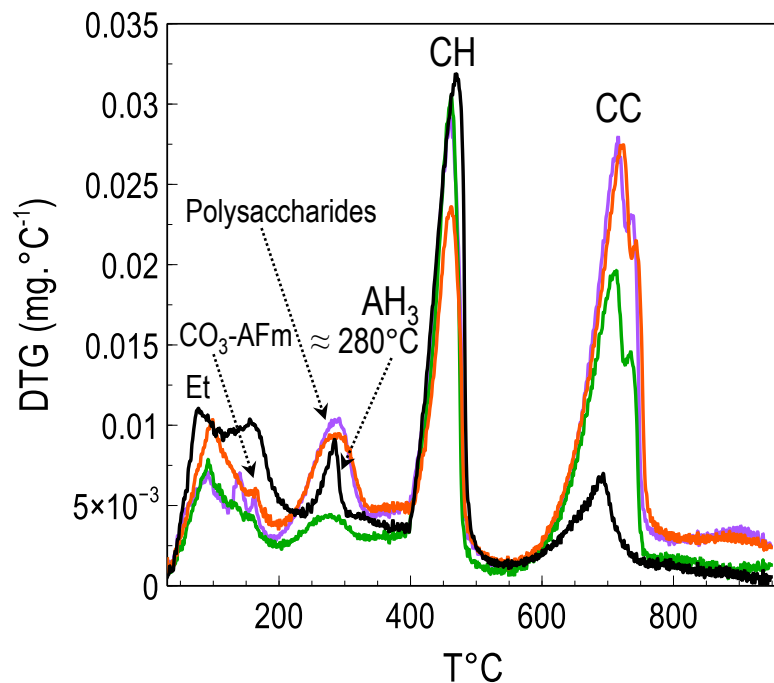
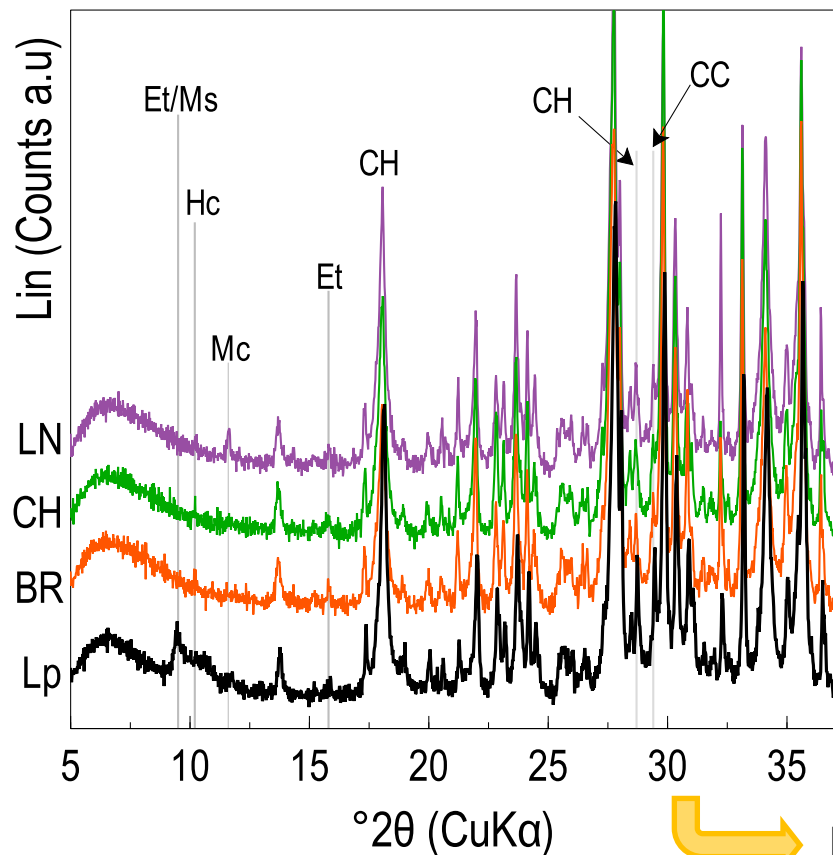
- Calculs nécessaires pour une analyse plus fiable
- $\Delta m_{220^{\circ}\text{C}-320^{\circ}\text{C}}$: polysaccharides (prélèvement → aléatoire)

- Analyses réalisées à la suite de la cure humide favorisant la pouzzolanité (pas d'air ambiant)

➔ LIANT + GRANULATS VÉGÉTAUX
➔ Carbonatation conséquente

- Moins de chaux combinée avec végétaux
→ Influence possible du monocarboaluminate

Granulats biosourcés et pouzzolanité



➤ Liant pur :

- Présence possible de gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$
 Al^{3+} libérés par la pouzzolane
→ Formation préférentielle d'ettringite
laissant moins de Ca^{2+} disponible (local)

➡ Pas de propriété liante

{ AH_3 — Et/Ms — CH}

➤ Modification de l'assemblage d'hydrates
avec les granulats végétaux (ici autour
de $2\theta = 10^\circ$)

{ $\text{CO}_3\text{-AFm}$ — CH — CC} (traces Et)

➡ Matériau volcanique naturellement hétérogène
Pour $2\theta \approx 30^\circ$: Augite titanifère + CC



IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille



Merci pour votre attention