

ETAPES pour trouver et valider des notions avec des IA

- Rechercher des études scientifiques sur le site "ACADEMIA"

<http://www.academia.edu>

Dans **NoteBook LM** poser de nombreuses questions pour faire ressortir ce qui nous intéresse. On trouve le vocabulaire de points clés (par ex structure amorphe / multiporosité ...). On affine les questions pour formuler au mieux les notions principales.

A partir de cette synthèse on peut faire un PDF et le proposer à d'autres IA (GPT / DeepSeek / Mistral / Gemini) pour vérifier les notions clés et corriger si besoin.

On demande d'autres formulations des infos validées.

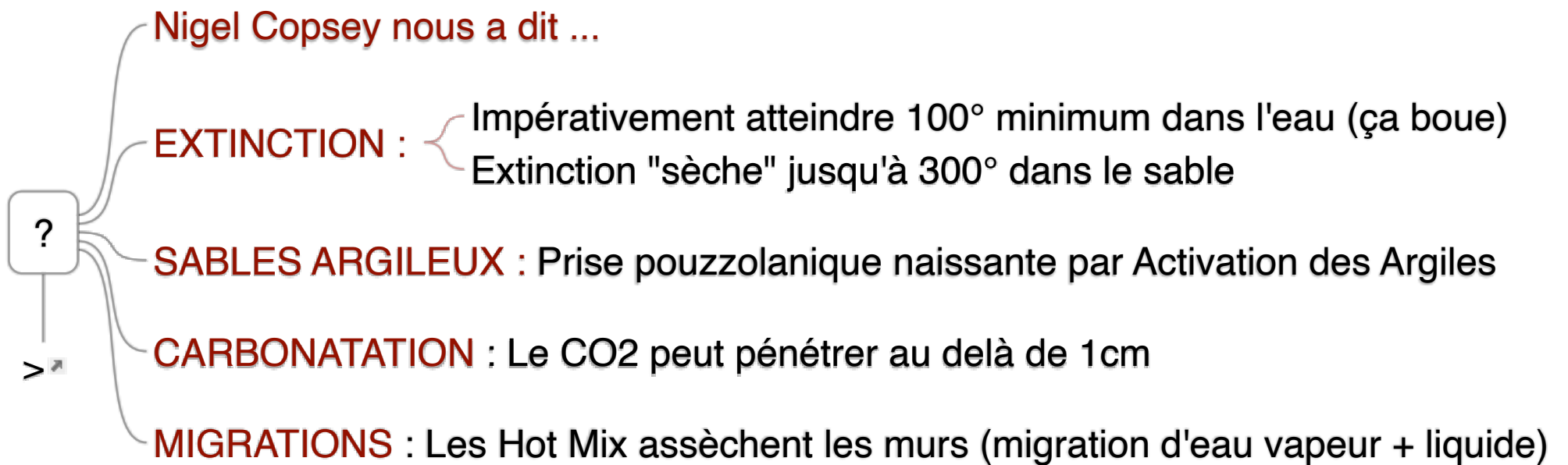
On va retenir ce qui est le plus clair, ce qui résume au mieux les infos trouvées.

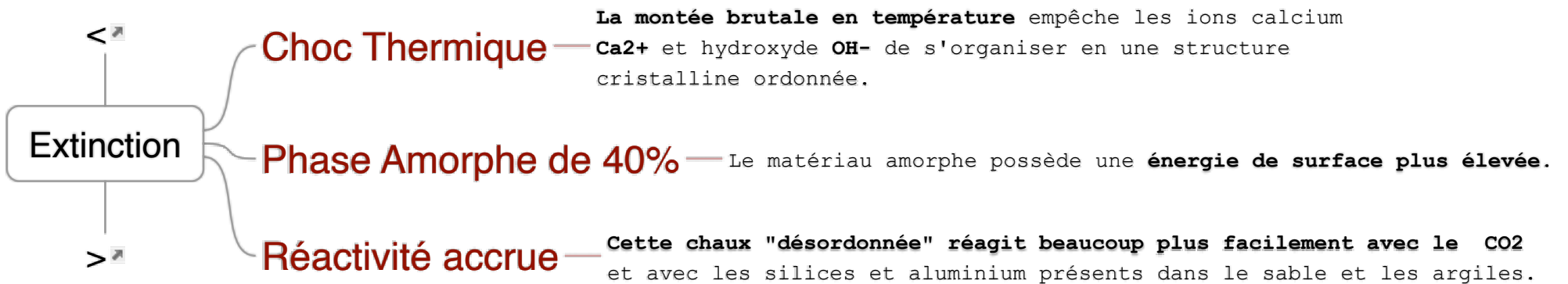
J'ai cherché des réponses à quelques questions que nous nous posons :

- Pourquoi l'extinction au delà de 100° est elle importante, autrement dit, quelles différences qualitatives entre un mortier chaud à base de chaux vive et un mortier à base de chaux déjà éteinte ?
- Quelle différence entre la prise pouzzolanique en présence de matériaux cuits ou d'argiles crues ?
- Quelle différence au niveau des migrations d'eau vapeur et liquide entre un Hot Mix et un mortier de chaux éteinte aérienne ou NHL

Ces questions simples m'ont conduit à découvrir les notions suivantes :

- **Structure amorphe** de la chaux suite à une extinction $> 100^\circ$
- **Réactivité accrue** de la chaux issue d'une extinction $> 100^\circ$ qui attaque les charges, l'argile et le support
- **Activation thermique des argiles** qui produit une prise pouzzolanique faible ... CAH CSH
- **Multi porosité** qui explique la perspiration accrue et la prise aérienne en profondeur





Argiles

```
graph LR; A[Argiles] --- B["L'alcalinité forte du mélange attaque les argiles crues ou les fines siliceuses"]; A --- C["Effet Pouzzolanique Naissant (Activation des Agrégats)"]; A --- D["Formation de Phases Pouzzolaniques : La chaux réagit avec cette silice activée pour former des phases pouzzolaniques naissantes : les Silicates de Calcium Hydratés > C-S-H et les Aluminates de Calcium Hydratés > C-A-H"]; A --- E["Valorise les sables terreux locaux."]; A --- F["Cet effet pouzzolanique est modéré par rapport à l'ajout d'une vraie pouzzolane cuite > 500° qui induit une réaction hydraulique forte et rapide. La pouzzolane induit aussi une microstructure plus dense (moins perspirante)"];
```

L'alcalinité forte du mélange **attaque les argiles crues** ou les fines siliceuses

Effet Pouzzolanique Naissant (Activation des Agrégats)

Formation de Phases Pouzzolaniques : La chaux réagit avec cette silice activée pour former des phases pouzzolaniques naissantes : **les Silicates de Calcium Hydratés > C-S-H** et les **Aluminates de Calcium Hydratés > C-A-H**

Valorise les sables terreux locaux.

Cet effet pouzzolanique est modéré par rapport à l'ajout d'une vraie pouzzolane cuite > 500° qui induit une réaction hydraulique forte et rapide.

La pouzzolane induit aussi une microstructure plus dense (moins perspirante)

Carbonatation

La violence de l'extinction et la production explosive de vapeur d'eau sculptent la matière.

La vapeur d'eau crée une structure à pores ouvertes et interconnectées.

Réseau de pores multi-échelle : 3 types de pores connectées

Macropores (10-100 micromètres) : pour le **drainage** de l'eau liquide.

Mésopores (0,1-10 micromètres).

Micropores (< 0,1 micromètre) : pour la **diffusion de vapeur**.

Porosité Totale : La porosité totale d'un Hot Mix est de **38 à 42%**, contre 25 à 30% pour un mortier NHL traditionnel.

Carbonatation Rapide : La porosité interconnectée favorise la pénétration du CO₂. La carbonatation complète est observée en **6 à 8 mois** contre 3 à 5 ans pour des chaux aériennes classiques.

Auto-Guérison (Self-Healing) : Des fragments de chaux non hydratés appelés "**clastes**" se forment pendant le mélange à chaud.

En cas de microfissure, l'eau de pluie réagit avec ces clastes pour former de la **calcite** CaCO₃ qui précipite et referme la brèche.

Migrations

Réseau de pores multi-échelle :

Macropores 10-100 micromètres)

Mésopores 0,1-10 micromètres)

Micropores < 0,1 micromètre)

L'évaporation à la surface du mur (analogue à la transpiration foliaire des plantes) crée une succion capillaire qui **tire l'humidité du cœur du mur** vers l'extérieur à travers ce réseau poreux connecté.

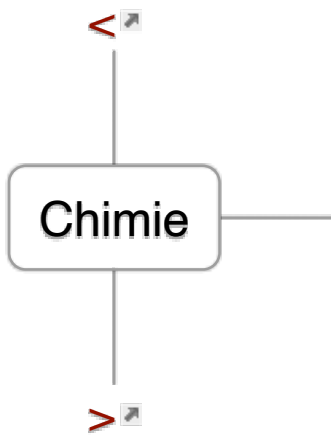
Loi de Poiseuille : Cette loi justifie que **le débit d'évacuation de l'eau est proportionnel à la puissance 4 du rayon du pore**, validant ainsi la supériorité du drainage du Hot Mix grâce à ses pores plus larges (macropores).

Respirabilité : Le Hot Mix a une perméabilité à la vapeur d'eau **jusqu'à 3 fois supérieure** aux mortiers NHL classiques.

Coefficient Mu : Le Hot Mix a un **Mu très bas de 5 à 7** indicateur d'une faible résistance à la diffusion de vapeur.

1. LA CHAÎNE CHIMIQUE : REACTIVITE ET PRISE

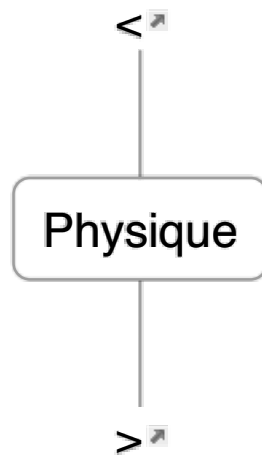
- Extinction à *haute température* (100 à 300 degrés)
- *Choc thermique* violent (empêche le réarrangement des ions)
- Création d'une *structure amorphe élevée* (40% à 60% de désordre)
- *Réactivité chimique accrue* (énergie de surface plus élevée)
- *Activation des argiles crues* et sables (dissolution)
- Formation de *phases pouzzolaniques naissantes* (C-S-H et C-A-H)
- *Prise légèrement hydraulique* (cohésion et résistance améliorées)



2. LA CHAINE PHYSIQUE : POROSITE ET BIOMIMETISME

- Réaction exothermique violente (libération brutale d'énergie)

- Production explosive de vapeur d'eau (micro-cavitation et expansion)



- Création d'une Multi-porosité hiérarchisée (Macro / Méso / Micro pores connectés)

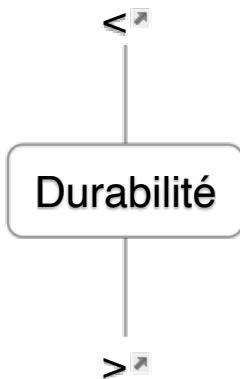
- Structure Biomimétique (comparable au xylème des plantes et aux os spongieux)

- Conséquence A : Pénétration facilitée du CO₂
= Carbonatation rapide et profonde

- Conséquence B : Gestion de l'eau optimisée
= Drainage liquide + Diffusion vapeur maximale

3. LA CHAINE DE DURABILITE : AUTO-GUERISON

- Mélange à chaud (Hot Mix)
- Formation de "Clastes" (fragments de chaux non hydratés dispersés)
- Apparition de microfissures dans le temps
- Infiltration d'eau de pluie sur les clastes
- Réaction chimique et précipitation de Calcite (CaCO_3)
- Auto-Guérison (fermeture naturelle de la fissure)



La Réaction et la Chimie :

Température que peut atteindre localement le mélange lors de l'extinction violente d'un Hot Mix ?

- Entre 100° et 300°. L'ébullition de l'eau (100°) est dépassée localement et ces pics de chaleur modifient la structure cristalline.

Chimiquement, ce qui différencie une chaux éteinte à chaud (Hot Mix) d'une chaux déjà éteinte en poudre, c'est le choc thermique qui crée 40 à 60% de phase amorphe, beaucoup plus réactive que la phase cristalline des chaux froides.

Les argiles attaquées forment des phases pouzzolaniques naissantes .

Physique et Porosité (Biomimétisme)

La particularité du réseau poreux créé par l'ébullition de la chaux ce sont ses pores de taille variable : Macropores > Mésopores > Micropores inter connectées.

C'est la vapeur sous pression qui sculpte cette "autoroute" à trois voies (Macro/Méso/Micro).

Gestion de l'Eau et Performances

Comparée à un mortier NHL classique la perméabilité à la vapeur (respirabilité) d'un Hot Mix est jusqu'à 3 fois supérieure. Son coefficient μ est très bas (5 à 7)

En cas de fissure grâce aux clastes de chaux non hydratés il y a **Auto-Guérison** (Self-Healing)

La réserve de chaux vive ou mal hydratée (clastes) réagit avec l'eau de pluie entrante pour recristalliser en calcite et fermer la brèche.

Résumé

Quelle est la différence entre un enduit grillé qui restera toujours poudreux et un enduit qui pourra reprendre sa carbonatation quand il va pleuvoir ?

En résumé ... Chimiquement, c'est la même chose, mais physiquement, la distance entre les particules a changé.

1. La Différence Chimique : Aucune (au départ)

Si vous analysez la poudre d'un enduit grillé et celle d'un enduit sain en pause, vous trouverez exactement la même molécule : de la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})$. Dans les deux cas, le CO_2 n'est pas encore fixé.

2. La Différence Physique : La "Distance de Connexion"

Tout se joue sur la **proximité** des particules au moment où l'eau disparaît.

La Chaux Grillée : Des "îlots Isolés" : Lorsque l'eau s'évapore trop vite (quelques heures après la pose), le mortier subit un **retrait** (il se contracte).

- **Le phénomène** : L'eau, qui servait de "lien" temporaire entre les particules de chaux et les grains de sable, disparaît.
- **La conséquence physique** : Les particules de chaux se retrouvent **isolées**, séparées par du vide (de l'air). Elles sont trop éloignées les unes des autres.
- **Pourquoi c'est irrécupérable** : Même si vous remouillez plus tard, la carbonatation va bien avoir lieu (**la chaux va devenir calcaire**), **mais chaque particule va durcir dans son coin**. Vous obtiendrez des grains de calcaire microscopiques (de la poussière de craie) posés les uns à côté des autres, sans aucun lien physique. C'est un enduit qui "farine".

La Chaux en Pause : Un "Squelette Connecté" : Ici, l'eau est restée assez longtemps (quelques jours) pour permettre un phénomène physique appelé la **crystallisation initiale**.

- **Le phénomène** : Les cristaux de chaux ont eu le temps de s'enchevêtrer légèrement et de coller aux grains de sable pendant que le milieu était pâteux. Des "ponts" solides se sont créés.
- **La conséquence physique** : Quand l'enduit sèche, ce réseau solide reste en place (comme une éponge sèche). Les particules sont **connectées**.
- **La reprise** : Quand l'humidité revient, l'eau circule à travers ce squelette existant. **Les nouveaux cristaux de calcite CaCO_3 qui vont se former vont se déposer sur les ponts existants, les renforçant et les épaississant**. C'est ce qu'on appelle la densification de la matrice.

Conclusion : La chaux a besoin d'eau pour transporter le CO_2 mais elle a surtout besoin d'une **continuité physique** pour que la pierre qui se forme soit solide. Le "grillage" est une rupture de cette continuité.

QUESTION : 1 volume de chaux vive = combien de volumes de chaux éteinte en poudre de type CL90 ?

- (**MVA** = Masse Volumique Apparente des poudres)
 - **Invariable** : Pendant l'extinction 1 Kg de chaux vive se combine à 320g d'eau
Donc 1 Kg de chaux vive = 1320g de chaux éteinte.
 - **Invariable** : le poids ma chaux Eteinte est 1,32 fois le poids de ma chaux VIVE
 - **Variable** : Avec ma chaux VIVE Eurocho en poudre je trouve 1 litre = 960g
1 litre de chaux vive Eurocho va donner $960 \times 1,32 = 1267$ g de chaux éteinte
 - **Variable** : Avec ma CL90 déjà éteinte en poudre je trouve 1 litre = 475g
donc sa **MVA** = 0,475 environ (ça dépend de la décompression en sortie de sac)
-

1 litre de chaux VIVE (Eurocho en poudre) = combien de litre de chaux CL90 poudre ?
L'extinction de 1 litre de chaux vive Eurocho donne 1267 g de chaux éteinte
ce qui correspond à $(1267 / 475) = 2,66$ litres de chaux éteinte de type CL90

Pour simplifier on peut dire ...

1 litre de chaux vive = 2,5 litres de chaux éteinte

Tests

Le Test de Perméance (Eau vapeur) mesure la "respirabilité" du mortier, la capacité des molécules de **vapeur d'eau** à traverser les pores du matériau sans se condenser.

Un Mu faible = Une résistance faible à la diffusion de vapeur (ça passe bien)

Le Test d'Absorption Capillaire (Eau Liquide) mesure la capacité du mortier à "boire" ou "pomper" l'eau. Il mesure la vitesse à laquelle l'eau liquide pénètre dans le mortier par effet de mèche.

On pose la face du prisme de mortier dans quelques millimètres d'eau.

On pèse l'échantillon à intervalles réguliers pour voir à quelle vitesse il s'alourdit en pompant l'eau

Le Résultat c'est le Coefficient d'absorption d'eau en $\text{g/m}^2/24\text{h}$ ou $\text{g/m}^2.\text{s}^{1/2}$ ($\text{s}^{1/2} = \sqrt{t}$)

Ce test valide la capacité du Hot Mix à *drainer* l'eau liquide vers la surface d'évaporation (capillarité active)

Le Test d'imbibition permet d'évaluer le % de vides accessible à l'eau dans un matériau.

Ça permet de comparer différents matériaux, par exemple le % de vides d'une pierre au % de vide accessible à l'eau d'un mortier de réparation de pierre. (**protocole page suivante**)

Un matériau très ouvert comme le Hot Mix est performant dans les deux domaines :

- Il laisse passer la **vapeur d'eau** massivement (Perméance élevée)
- Il déplace l'**eau liquide** rapidement (Capillarité forte)